www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT

JAARGANG 27, 1965/66, no. 1

Peltier-koeling

W. Lechner

537.322.15:536.48

Het onderzoek dat in het Philipslaboratorium te Aken is verricht naar de technologie en de toepassingen van Peltier-koeling, is reeds sedert enkele jaren afgesloten. Het heeft geleid tot de serieproduktie van verschillende typen van Peltier-batterijen in de Philipsfabrieken. Gezien de nog steeds toenemende interesse in deze koelmethode, leek een samenvatting van de grondslagen, de technologie en de toepassingsmogelijkheden ervan hier op zijn plaats.

Hoewel de thermo-elektrische effecten sinds hun ontdekking meer dan honderd jaar geleden (Seebeck 1822, Peltier 1834, Thomson 1854) regelmatig door natuurkundigen werden onderzocht, heeft men, tenminste wat het Peltier-effect betreft, pas in de laatste tijd de materialen gevonden en ontwikkeld die een technische toepassing mogelijk maken, te weten de halfgeleidende materialen. Koelapparaten gebaseerd op het Peltier-effect (Peltier-batterijen) werden in de afgelopen jaren zozeer verbeterd dat ze nu op verschillende gebieden in gebruik zijn. Vanzelfsprekend zijn dit die gebieden waar de speciale voordelen van belang zijn die deze apparaten hebben ten opzichte van de traditionele koelmachines — de geringe afmetingen, de aanpassingsmogelijkheden aan het koelobject, de gemakkelijke maar nauwkeurige regelbaarheid — en waar het nog bestaande nadeel van een kleiner rendement een geringe rol speelt.

Om een overzicht te geven van deze koelmethode en van de toepassingsmogelijkheden ervan, zullen we in dit artikel eerst de thermo-elektrische effecten en het principe van de constructie van Peltier-elementen en -batterijen kort omschrijven. Dan volgt een atomistische beschrijving van de thermo-elektrische effecten, en daarna een behandeling van de belangrijkste karakteristieke grootheden van het Peltier-element als warmtepomp (of, zoals men in de koudetechniek liever zegt, koudepomp). Dit vooral met het oog op het verband tussen deze grootheden (zoals b.v. rendement en bereikbaar temperatuurverschil) en de materiaaleigenschappen van de gebruikte halfgeleiders, dat tot uitdrukking komt in een „kwaliteitsgetal". De verdere inhoud van het artikel heeft betrekking op de keuze en de bereiding van het halfgeleidermateriaal (van bismuttelluride afgeleide verbindingen), op de bedrijfsvoorwaarden voor Peltier-batterijen en op enkele karakteristieke meettechnische en laboratorium-toepassingen. De gemaakte keuze moge een beeld geven van wat er nodig is om koelproblemen van verschillende aard op te lossen — met zwakke tot zeer strenge eisen, b.v. met betrekking tot de constantheid van de temperatuur. Tegelijkertijd moge het artikel een stimulans zijn om andere toepassingen op te sporen.

W. Lechner is medewerker van het laboratorium Aken van Philips Zentrallaboratorium GmbH.

De thermo-elektrische effecten

Van de thermo-elektrische effecten is het *Seebeck-effect* het eerst ontdekt. Dit effect berust op het verschijnsel dat in vele stoffen een temperatuurgradiënt dT/dx met een elektrisch veld E gepaard gaat:

$$E = \alpha \frac{dT}{dx}. \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

α heet de Seebeck-coëfficiënt van het materiaal. Als men een gesloten kring maakt van twee geleiders A en B met verschillende Seebeck-coëfficiënten α_A en α_B (zie *fig. 1*) en de contacten op verschillende temperaturen houdt, dan zal een ergens in de kring ingescha-

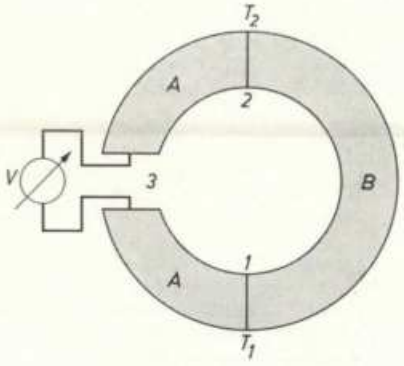


Fig. 1. Het Seebeck-effect. Als de contacten *1* en *2* tussen de geleiders A en B op twee verschillende temperaturen T_1 en T_2 gehouden worden, ontstaat er in de kring een e.m.k. V volgens verg. (2).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

kelde voltmeter een spanning, de Seebeck-spanning, aanwijzen. De Seebeck-spanning is dus de netto-e.m.k. van het thermo-element. Deze is:

$$V = \int_{3(A)}^{2} E\,dx + \int_{2(B)}^{1} E\,dx + \int_{1(A)}^{3} E\,dx$$

$$= \int_{1(A)}^{2} E\,dx - \int_{1(B)}^{2} E\,dx = \int_{T_1}^{T_2} (\alpha_A - \alpha_B)\,dT. \quad . \quad (2)$$

In de praktijk wordt dus alleen het verschil $\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B$ van de „absolute" Seebeck-coëfficiënten α_A en α_B gemeten. α_{AB} heet de „differentiële" Seebeck-coëfficiënt van de combinatie AB. De absolute Seebeck-coëfficiënt kan worden bepaald door een meting tegen een goed geleidend metaal (b.v. koper), dat in de regel een relatief kleine thermospanning heeft.

Het *Peltier-effect* berust op het optreden van een energiestroom als gevolg van een elektrische stroom. De Peltier-energiestroomdichtheid is evenredig met de elektrische stroomdichtheid; de evenredigheidsfactor is de (absolute) Peltier-coëfficiënt Π. Eventuele andere energiestromen, zoals b.v. de afvoer van Joule-warmte en de warmtegeleiding, worden hier buiten beschouwing gelaten. Als we in fig. 1 de voltmeter vervangen door een gelijkstroombron (*fig. 2*), dan vloeit door A en B een elektrische stroom I. Zijn nu de absolute Peltier-coëfficiënten Π_A en Π_B van A en B en dus ook

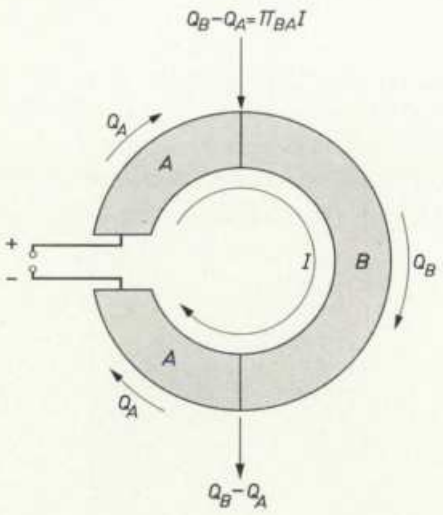


Fig. 2. Het Peltier-effect. Als er in de stroomkring die door de geleiders A en B gevormd wordt een stroom I loopt, komt er bij het ene contact een hoeveelheid warmte vrij, terwijl bij het andere contact een zelfde hoeveelheid warmte aan de omgeving wordt onttrokken. Deze hoeveelheid warmte wordt gegeven door de vergelijkingen (3) en (4). (De gelijkstroombron kan, evenals de voltmeter bij het Seebeck-effect, op een willekeurige plaats in de kring worden tussengevoegd, b.v. in één van de contacten, zoals dat bij de praktische uitvoering van Peltier-elementen gedaan wordt.)

de energiestromen Q_A en Q_B door A en B verschillend, dan komt het verschil van de beide energiestromen aan het ene contact als warmte vrij, terwijl het aan het andere contact aan de omgeving als warmte onttrokken wordt. Het element werkt dus als een warmtepomp. Voor de bij een contact per seconde opgenomen dan wel vrijgekomen warmte geldt:

$$Q = \Pi_{AB} I, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

met

$$\Pi_{AB} = \Pi_A - \Pi_B. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Π_{AB} is de „differentiële" Peltier-coëfficiënt van de combinatie AB. (In het vervolg laten we veelal kortheidshalve de indices weg. Uit het verband moge dan steeds blijken of van een absolute dan wel van een differentiële coëfficiënt sprake is.)

In het algemeen hangen α en Π nog van de temperatuur af. Deze temperatuurafhankelijkheid kan voor verschillende materialen zeer verschillend zijn; op thermodynamische gronden geldt echter (voor de absolute en daarmee ook voor de differentiële coëfficiënten) steeds de relatie van Thomson:

$$\Pi = \alpha T, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

waarin T de absolute temperatuur is [1].

Voor een goed begrip van het hierna behandelde zullen wij de constructie van Peltier-elementen en -batterijen hier nog iets nader beschrijven. *Fig. 3* laat zien hoe het schema van fig. 2 in de praktijk wordt gerealiseerd. Bepalend hiervoor zijn de bereidingswijze van de halfgeleidermaterialen en de eis dat de warmteopname en -afgifte aan de contacten voldoende snel moet kunnen plaatsvinden. De contacten worden als brede platte verbindingsstukken van een goed geleidend metaal uitgevoerd. De ene geleider (A) bestaat uit halfgeleidermateriaal van type N, de andere (B) uit halfgeleidermateriaal van type P. Aan het ene contact (het bovenste in fig. 3) wordt de aan het koelobject onttrokken warmte opgenomen (per seconde een hoeveelheid Q_K); hier stelt zich een temperatuur T_K in. Aan het andere contact, dat door geschikte warmtewisselaars (b.v. met vloeistofkoeling) op de temperatuur T_W wordt gehouden, wordt per seconde een hoeveelheid warmte Q_W afgestaan.

Om het koelvermogen te vergroten en om de aanpassing aan het te koelen object te vergemakkelijken, wordt een groot aantal van dergelijke Peltier-elemen-

[1] Er bestaat nog een tweede relatie van Thomson, waarin een derde thermo-elektrisch effect, het Thomson-effect, optreedt. Als er nl. in het materiaal zowel een elektrische stroom als een temperatuurgradiënt aanwezig is, wordt er, naast de Joule-warmte, nog een hoeveelheid warmte ontwikkeld, de zg. Thomson-warmte. Deze kan positief of negatief zijn. In de praktijk speelt de Thomson-warmte meestal een onbelangrijke rol; we zullen deze in het vervolg geheel buiten beschouwing laten.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

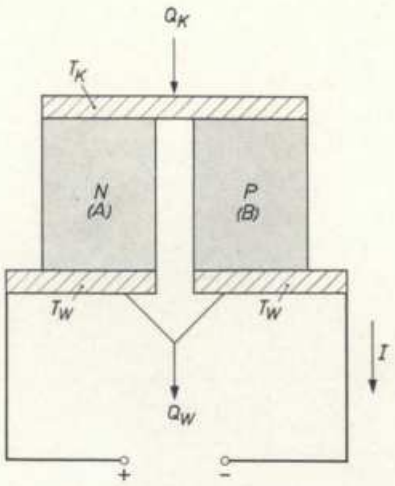


Fig. 3. Het Peltier-element als warmtepomp. Het element bestaat uit een blok *N*-geleidend materiaal (*A*), een blok *P*-geleidend materiaal (*B*) en metalen contactplaten. Aan de koude kant op temperatuur T_K wordt per seconde een hoeveelheid warmte Q_K aan de omgeving onttrokken; aan de warme kant op temperatuur T_W komt per seconde een hoeveelheid warmte Q_W vrij (die men b.v. met koelwater afvoert). *I* stroomsterkte. In het algemeen verschillen Q_W en Q_K van de Peltier-warmte $\Pi_{BA}I$ omdat ze bovendien nog door de Joule-warmte en de warmtegeleiding worden bepaald.

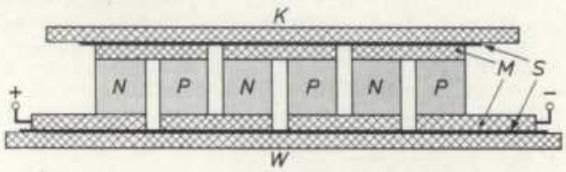


Fig. 4. Schema van de constructie van een Peltier-batterij uit een reeks blokken halfgeleidend materiaal van type *N* en type *P*. *M* metalen verbindingsstukken. *S* elektrisch isolerende laag. *K* koude kant. *W* warme kant.

ten tot een Peltier-batterij aaneengeschakeld (zie *fig. 4*), en wel zodanig dat zij elektrisch in serie, maar wat het warmtetransport betreft parallel staan. De aldus ontstane ketens van elementen worden tussen metaalplaten gemonteerd. Daarbij wordt een zeer dunne tussenlaag aangebracht die elektrisch isoleert maar tegelijkertijd zo goed mogelijk de warmte geleidt; een alternatief voor deze tussenlaag is het eloxeren van het oppervlak van de metaalplaten. Hierdoor ontstaat een mechanisch robuuste constructie, terwijl tevens het isolatieprobleem is opgelost, zodat de gebruiker het koelobject en de warmtewisselaars direct aan de batterij kan bevestigen.

Variaties op deze constructie die voor speciale doeleinden bestemd zijn, komen in het laatste hoofdstuk ter sprake.

Atomistische verklaring van de thermo-elektrische effecten

Het gebruikelijke model van de elektrische geleiding in halfgeleiders en metalen leidt gemakkelijk tot een kwalitatieve verklaring van de thermo-elektrische effecten en van het feit dat deze in halfgeleiders aanzienlijk groter zijn dan in metalen.

In dit model wordt de elektrische stroom gedragen door vrije ladingdragers — elektronen in metalen en in halfgeleiders van type *N*, gaten in halfgeleiders van type *P*. De weerstand ontstaat doordat de ladingdragers verstrooid worden door roostertrillingen (fononen) of (fysische of chemische) roosterfouten.

Het essentiële verschil tussen metalen en halfgeleiders komt in het energiebandenmodel goed tot uiting. De elektronen kunnen zich in toestanden bevinden waarvan de energieën in banden bijeen liggen; de verdeling van de elektronen over deze toestanden is de Fermi-Dirac-verdeling. De bezettingsgraad f (het gemiddelde aantal elektronen per toestand) is 1 (alle toestanden bezet) voor $E \ll E_F$, en $f = 0$ (alle toestanden leeg) voor $E \gg E_F$, waarbij E_F de Fermi-energie is; alleen in een energiegebied van de orde van grootte kT om E_F heen ligt f tussen 1 en 0. Geheel lege of geheel gevulde banden dragen niet tot de geleiding bij.

In halfgeleiders ligt E_F tussen twee energiebanden (zie *fig. 5*). In *N*-geleidend materiaal vindt geleiding plaats door elektronen in de bovenste, overigens geheel lege band, de geleidingsband; in *P*-geleidend mate-

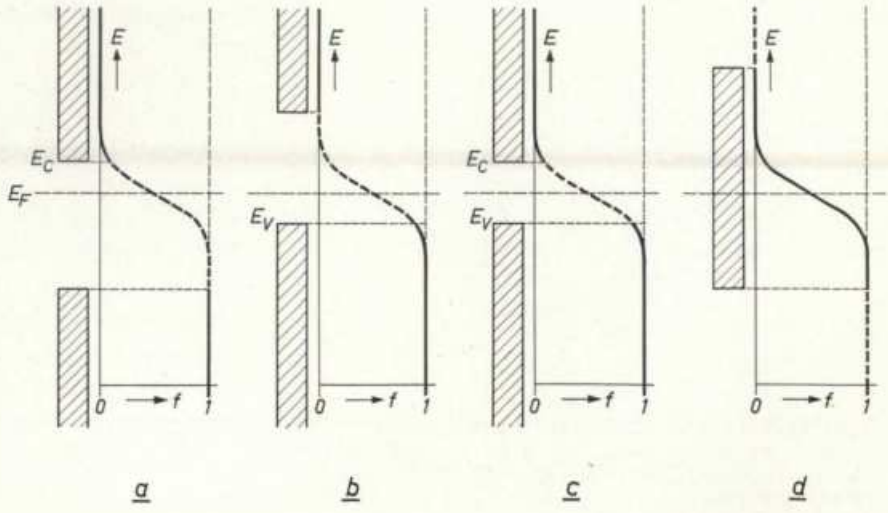


Fig. 5. De Fermi-Dirac-verdeling in halfgeleiders en metalen. De bezettingsgraad f van de toestanden (het gemiddelde aantal elektronen per toestand) is horizontaal uitgezet, verticaal de energie. Links van elke grafiek zijn de banden van toegestane energieën gearceerd aangegeven.
a) Halfgeleider van type *N*. De geleiding vindt plaats door enkele elektronen in de geleidingsband (onderste rand E_C).
b) Halfgeleider van type *P*. De ladingdragers zijn gaten in de valentieband (bovenste rand E_V).
c) Intrinsieke halfgeleider. Er zijn ladingdragers in beide banden.
d) Metaal. De geleiding vindt plaats door elektronen met een energie rondom E_F.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

riaal door gaten in de onderste, overigens geheel gevulde band, de valentieband. Deze elektronen resp. gaten zijn afkomstig van donoren resp. acceptoren. In intrinsieke halfgeleiders bevatten beide banden ladingdragers door de excitatie van elektronen van de valentieband naar de geleidingsband. In metalen ligt E_F ergens midden in een toegestane energieband; de geleiding vindt dan plaats door elektronen met energieën rondom E_F.

Als in halfgeleiders van type N of P het Fermi-niveau heel dicht bij de rand van de band waarin de geleiding plaatsvindt of zelfs *in* die band komt te liggen, noemt men de halfgeleider „ontaard"; dan geldt bij die rand niet meer $f \ll 1$ (voor N-geleiders) of $1-f \ll 1$ (voor P-geleiders). Eenvoudigheidshalve zullen we in de navolgende beschouwingen steeds veronderstellen dat de halfgeleiders niet ontaard zijn. Hoewel de ontaarde halfgeleiders in de praktijk van de Peltier-koeling zeer belangrijk zijn, vormen juist de beschouwingen over niet-ontaarde halfgeleiders een betere basis voor een begrip van de thermo-elektrische effecten.

Het Fermi-niveau speelt een belangrijke rol als referentie-energie. De voorwaarde voor thermisch evenwicht in het „elektronengas", b.v. bij een contact tussen twee geleiders of halfgeleiders, is namelijk dat het Fermi-niveau overal even hoog ligt. Als men de energie van een elektron dus steeds vanaf het Fermi-niveau telt, dan kunnen de energieën van elektronen in verschillende delen van een combinatie van geleiders onmiddellijk met elkaar vergeleken worden. Een *gat* op een niveau *beneden* het Fermi-niveau (zoals b.v. optreedt in P-geleiders) heeft dan steeds een *positieve* energie.

Het Peltier-effect

1) Het Peltier-effect in extrinsieke halfgeleiders.

We beschouwen een stroomkring van een N-geleider en een P-geleider in serie (*fig. 6*). In het P-gedeelte gaan de ladingdragers (gaten) met de stroom mee, in het N-gedeelte gaan de ladingdragers (elektronen) er tegen in. In beide delen gaan dus ladingdragers van het ene (in fig. 6 het bovenste) contact waar ze gegenereerd worden, naar het andere (het onderste) waar ze recombineren. De relatieve ligging van de energiebanden (*fig. 7a*) bij de contacten wordt bepaald door de eis dat het Fermi-niveau overal even hoog ligt. Aan het ene (het „koude") contact wordt de energie die nodig is voor het genereren van ladingdragers als thermische energie aan de omgeving onttrokken. De bij de recombinatie aan het andere contact vrijkomende energie wordt als warmte aan de omgeving afgegeven. Het resultaat is dus dat er een transport van warmte plaatsvindt. Dit warmtetransport als gevolg van een elektrische stroom is het Peltier-effect.

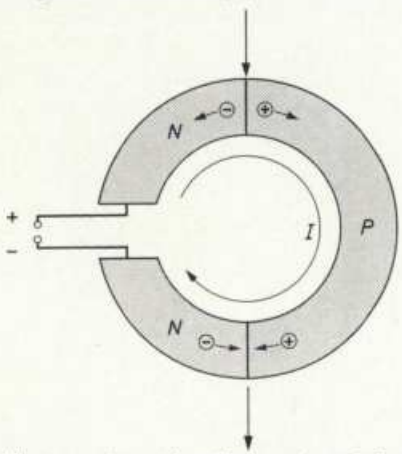


Fig. 6. Als er een stroom loopt in een stroomkring die bestaat uit een N- en een P-halfgeleider, dan worden er van het ene contact in beide halfgeleiderstukken ladingdragers naar het andere contact getransporteerd.

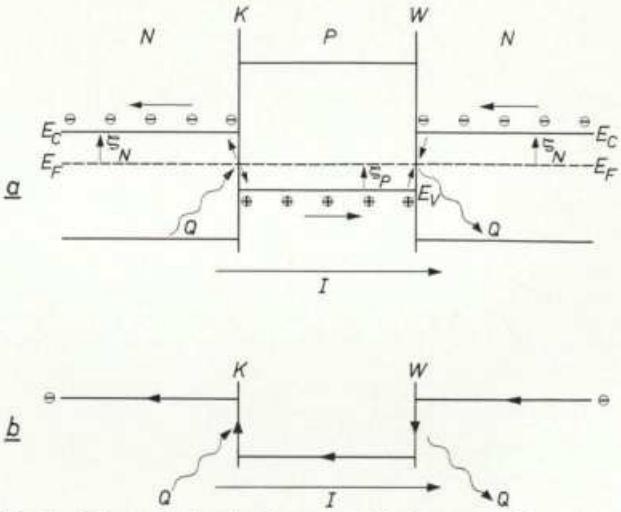


Fig. 7. *a*) De energiebanden in een combinatie van een N- met een P-halfgeleider. E_F Fermi-niveau. E_C onderste rand van de geleidingsband in de N-halfgeleider. E_V bovenste rand van de valentieband in de P-halfgeleider. I elektrische stroom. Bij het koude contact K worden gat-elektron-paren gegenereerd, waarbij thermische energie Q aan de omgeving onttrokken wordt. Bij het warme contact W komt bij de recombinatie de warmte Q vrij. $\zeta_N = E_C - E_F$, $\zeta_P = E_F - E_V$.
b) De energieën van de geleidingstoestanden in een kring van twee halfgeleiders. Bij het koude contact K worden de geleidingselektronen door thermische energie van de omgeving tot een hogere energietoestand geëxciteerd. Bij het warme contact W vallen ze terug, waarbij de warmte Q vrijkomt.

De beschrijving van het Peltier-effect die we hierboven hebben gegeven, is aangepast aan de combinatie van een N-geleider met een P-geleider. De generatie of de recombinatie van een gat-elektron-paar is echter niets anders dan de sprong van een elektron tussen twee energieniveaus. In het algemeen zal er in een stroomkring van twee halfgeleidende materialen een Peltier-effect optreden als de energieën van de toestanden waarin de geleiding plaatsvindt, voor de twee halfgeleiders verschillend zijn (fig. 7*b*).

De warmteontwikkeling of -onttrekking vindt plaats aan de contacten waar het elektron een energiesprong maakt. Het Peltier-effect is dus een differentieel effect

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van twee geleiders; alleen het *verschil* in de energieën van de geleidingstoestanden is relevant. Het is evenwel nuttig, formeel een *absolute* Peltier-coëfficiënt voor één materiaal in te voeren; dit gebeurt op de volgende wijze. Met het Fermi-niveau als vast referentieniveau, kan men aan elk elektron een energie toekennen. Deze energie wordt met het elektron meegevoerd en een elektrische stroom heeft dus een energiestroom ten gevolge. De verhouding van de energiestroom tot de elektrische stroom is de absolute Peltier-coëfficiënt.

De absolute Peltier-coëfficiënt heeft voor een *N*-geleidend en een *P*-geleidend materiaal tegengesteld teken. Terwijl nl. de energie in beide gevallen met de deeltjes meestroomt, gaat de elektrische stroom in een *P*-geleider in dezelfde richting als de deeltjes, maar in een *N*-geleider in tegengestelde richting. Dientengevolge kan men de grootste Peltier-effecten verwachten in combinaties van *N*- met *P*-geleiders.

Een uitdrukking voor de absolute Peltier-coëfficiënt van een *N*-geleider vindt men als volgt. De gemiddelde getransporteerde energie per elektron is samengesteld uit een „potentieel" en een „kinetisch" gedeelte. Het potentiële gedeelte is (zie fig. 7*a*) $\zeta_N = E_C - E_F$; dit is de energie van het elektron als het zich zonder kinetische energie aan de rand van de geleidingsband bevindt. Het kinetische gedeelte is $A_N kT$. Als de gemiddelde *getransporteerde* kinetische energie per elektron dezelfde was als de gemiddelde kinetische energie, dan zou men verwachten $A_N = {}^3/_2$. De gemiddelde getransporteerde kinetische energie is echter groter doordat de energierijke elektronen niet alleen *meer* energie transporteren, maar dit tevens *sneller* doen. Bovendien worden dikwijls, b.v. bij verstrooiing door geioniseerde roosterfouten, de energierijke elektronen relatief minder verstrooid. Zo vindt men voor A_N de waarde 2 of 4, naar gelang de elektronen overwegend door akoestische roostertrillingen dan wel door geioniseerde roosterfouten worden verstrooid.

De gemiddelde getransporteerde energie per elektron is dus $A_N kT + \zeta_N$. De getransporteerde lading per elektron is $-e$ en de absolute Peltier-coëfficiënt (de verhouding van energie- tot ladingtransport) is dus:

$$\Pi_N = -\frac{1}{e}(A_N kT + \zeta_N). \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Evenzo vindt men voor halfgeleiders van type *P*:

$$\Pi_P = +\frac{1}{e}(A_P kT + \zeta_P), \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

waarin $\zeta_P = E_F - E_V$ (zie weer fig. 7*a*).

Substitueert men (6) en (7) in (3) en (4), dan volgt:

$$Q = \frac{I}{e}\left[(A_N + A_P)kT + \zeta_N + \zeta_P\right]. \quad . \quad (8)$$

In het warme contact is I/e het aantal per seconde recombinerende paren van ladingdragers. In deze vergelijking komt dus tot uitdrukking dat de totale energie van deze paren in warmte wordt omgezet. In het koude contact heeft (8) het omgekeerde teken: de aan de omgeving onttrokken warmte wordt in de energie van de gecreëerde paren van ladingdragers omgezet.

Bij de behandeling van de Peltier-koeling gebruikt men vaak, in plaats van de Peltier-coëfficiënt Π, de Seebeck-coëfficiënt α van het materiaal, die onmiddellijk met Π samenhangt volgens de Thomson-relatie (5): $\Pi = \alpha T$. Daarom geven we hier nog de uitdrukking voor de Seebeck-coëfficiënt van een *N*- resp. *P*-geleider, zoals die uit (6) resp. (7) en (5) volgt:

$$\alpha_N = -\frac{k}{e}\left[A_N + \frac{\zeta_N}{kT}\right], \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

$$\alpha_P = +\frac{k}{e}\left[A_P + \frac{\zeta_P}{kT}\right]. \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

Wat de temperatuurafhankelijkheid van α betreft, zij nog opgemerkt dat deze niet alleen gegeven is door de in (9, 10) expliciet optredende T. Ook ζ is in het algemeen van de temperatuur afhankelijk. Bij de thermo-elektrisch interessante halfgeleiders is het nu vaak zo dat de temperatuurafhankelijkheid van ζ de expliciet optredende T enigszins compenseert; aangezien de eerste term meestal als temperatuuronafhankelijk opgevat kan worden, rekent men in de praktijk dan ook dikwijls met een temperatuuronafhankelijke α. In deze, enigszins grove, benadering is dan tevens Π evenredig met T.

2) Het Peltier-effect in metalen.

Het Peltier-effect in *metalen* is aanzienlijk kleiner dan in extrinsieke halfgeleiders. Na het voorgaande kan men dit als volgt inzien. In halfgeleiders hebben de thermo-elektrische effecten tegengesteld teken voor elektronen en voor gaten. Als deze tegelijk aanwezig zijn, zullen de effecten elkaar gedeeltelijk (of, in bijzondere gevallen, geheel) compenseren. Dit is de situatie in intrinsieke halfgeleiders, waarin men inderdaad relatief kleine thermo-elektrische effecten vindt. De situatie in metalen is nu, in menig opzicht, niet essentieel anders dan die in intrinsieke halfgeleiders waarin de bandafstand naar nul gaat (vgl. fig. 5).

Het voor de thermo-elektrische effecten belangrijke verschil tussen metalen en extrinsieke halfgeleiders kan men als volgt samenvatten: in een extrinsieke halfgeleider worden lading en energie getransporteerd door ladingdragers aan één kant van het Fermi-niveau, in een metaal daarentegen door ladingdragers aan beide kanten van het Fermi-niveau.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

We willen het Peltier-effect in metalen nog iets nader bespreken. Eenvoudigheidshalve zullen we ons tot een eendimensionale voorstelling beperken. In *fig. 8* is de bezettingsgraad van de toestand uitgezet tegen de snelheid die de elektronen in deze toestand bezitten. Bij $T = 0$ °K zijn alle toestanden onder het Fermiveau (dus met snelheden onder de Fermi-snelheid v_F) volledig bezet, die daarboven geheel leeg. Boven het absolute nulpunt wordt deze scherpe grens in de verdeling vervaagd. In beide ge-

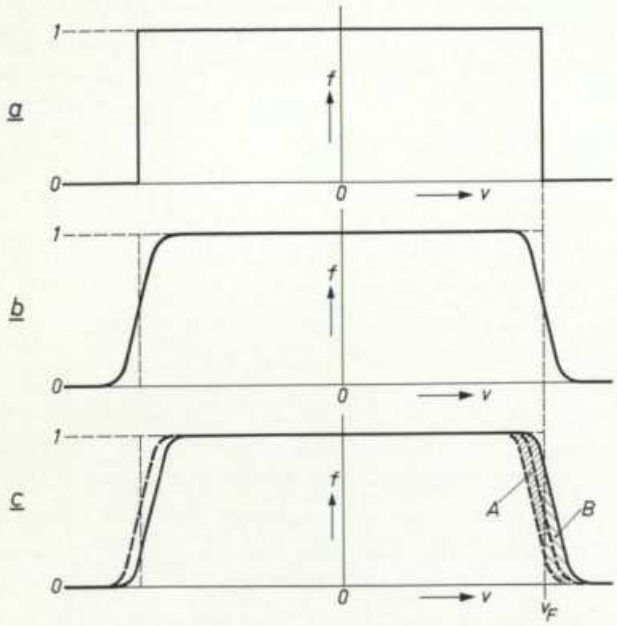


Fig. 8. Het Peltier-effect in metalen. De bezettingsgraad f van de toestanden waarin de elektronen een snelheid v hebben, is uitgezet als functie van v in een eendimensionele voorstelling. v_F Fermi-snelheid. *a*) $T = 0$ °K, $I = 0$. *b*) $T > 0$ °K, $I = 0$. *c*) $T > 0$ °K, $I \neq 0$. De door de strook A resp. B vertegenwoordigde elektronen transporteren een negatieve resp. een positieve energie naar rechts. De absolute Peltier-coëfficiënt wordt bepaald door het verschil tussen de absolute waarden van deze energiehoeveelheden; hij wordt in eerste benadering nul.

vallen compenseren in de stroomloze toestand de snelheden naar links en naar rechts elkaar precies. Gaat er een stroom door de geleider, dan verschuift de verdeling iets. De door de stroken A en B vertegenwoordigde elektronen met ongecompenseerde snelheden zijn verantwoordelijk voor het netto lading- en energietransport. Telt men de energie vanaf het Fermi-niveau, dan tranporteren de door B gerepresenteerde elektronen positieve energie, de door A gerepresenteerde elektronen echter negatieve energie naar rechts. Deze energiehoeveelheden zijn in absolute waarde ongeveer gelijk en zij compenseren elkaar in eerste benadering. In eerste instantie is er dus geen Peltier-effect in metalen. Dat er toch een effect is, berust op het feit dat de compensatie van de twee getransporteerde energiehoeveelheden niet volledig is. Voor deze onvolledigheid van de compensatie noemen we twee oorzaken. Ten eerste zijn de twee energiehoeveelheden die door de elektronen in A resp. B getransporteerd worden, per elektron in absolute waarde niet precies gelijk. Ten tweede is er in het algemeen een klein verschil tussen de toestandsdichtheden boven en onder het Fermi-niveau, zodat het aantal elektronen in A niet precies gelijk is aan dat in B. Het betrekkelijk grote Peltier-effect in halfmetalen en enkele overgangsmetalen kan verklaard worden door een sterke gradiënt in de toestandsdichtheid bij het Fermiveau.

Het Seebeck-effect

1) Het Seebeck-effect in halfgeleiders.

Vanwege het nauwe verband dat er bestaat tussen het Peltier-effect en het Seebeck-effect geven we hier volledigheidshalve ook nog een kwalitatieve verklaring van het Seebeck-effect. We beschouwen eerst een halfgeleider. Stel er heerst een temperatuurgradiënt loodrecht op een gegeven doorsnede door een stuk halfgeleidermateriaal. De ladingdragers die, van de warme kant komende, deze doorsnede passeren, zijn iets warmer dan de ladingdragers die van de koude kant komen, dat wil zeggen: hun gemiddelde (thermische) snelheid is iets groter. Als de concentratie aan beide kanten dezelfde zou zijn, zou er dus een nettostroom van ladingdragers zijn van de warme naar de koude kant („thermodiffusie"). In een geïsoleerd stuk halfgeleidermateriaal wordt in de stationaire toestand deze thermodiffusiestroom gecompenseerd door twee tegenstromen: in de eerste plaats zullen de getransporteerde ladingdragers een concentratiegradiënt opbouwen die een concentratiediffusiestroom tot gevolg heeft, en in de tweede plaats zullen ze een lading, dus een elektrisch veld en dus een veldstroom opwekken. De aanwezigheid van dit elektrische veld als gevolg van een temperatuurgradiënt is het Seebeck-effect.

We laten hier nog een eenvoudige (zeer grove) schatting van de grootte van het effect volgen, waarbij we ons beperken tot het geval dat de concentratiediffusiestroom geen rol speelt en dat de energie van de ladingdragers slechts uit thermische kinetische energie bestaat. De gemiddelde vrije weglengte van de ladingdragers zij l. De ladingdragers die van de warme (resp. koude) kant van een gegeven doorsnede komen, hebben een gemiddelde snelheid die hoort bij een doorsnede op afstand $\frac{1}{2}l$ aan de warme (resp. koude) kant van de beschouwde doorsnede waar zij voor het laatst gebotst hebben en de temperatuur van het rooster hebben gekregen. Dit geeft een thermodiffusiestroom:

$$\tfrac{1}{2}(nev_{x+\frac{1}{2}l} - nev_{x-\frac{1}{2}l}) = \tfrac{1}{2}\, ne\, \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}\, l\,.$$

Stelt men

$$\tfrac{1}{2}\, mv^2 = \tfrac{1}{2}\, kT,$$

dus

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x} = \tfrac{1}{2}\, \frac{k}{mv}\, \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x},$$

en stelt men de thermodiffusiestroom gelijk aan de veldstroom σE (met voor het geleidingsvermogen

$$\sigma = ne\mu = \frac{ne^2\, l}{mv},$$

waarbij $\mu = el/mv$ de beweeglijkheid is), dan krijgt men $E = \alpha\, \mathrm{d}T/\mathrm{d}x$ met $\alpha = \frac{1}{2}\, k/e$. Volgens deze schatting bevat α dus alleen de grootheden k en e en wel, in overeenstemming met de relatie van Thomson, op dezelfde wijze als de „kinetische term" in Π gedeeld door T (zie verg. 6).

Bij een nauwkeurige beschouwing, die tot (9) en (10) leidt, moet men er rekening mee houden dat de temperatuur, het Fermiveau (ten opzichte van de randen van de banden) en de concentratie van de ladingdragers nauw met elkaar samenhangen en van de plaats afhankelijk zijn.

2) Het Seebeck-effect in metalen.

In metalen is het Seebeck-effect weer erg klein. In *fig. 9* is de bezettingsgraad van de toestand uitgezet tegen de absolute waarde van de bijbehorende snelheid bij twee temperaturen (eendimensionaal). Indien er een temperatuurgradiënt is, geven de twee krommen de snelheidsverdelingen van de door een gegeven doorsnede zich naar rechts resp. naar links bewegende elektronen. Het oppervlak C vertegenwoordigt een overschot Δn_C van elektronen met een gemiddelde snelheid v_C b.v. naar rechts; D een overschot

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

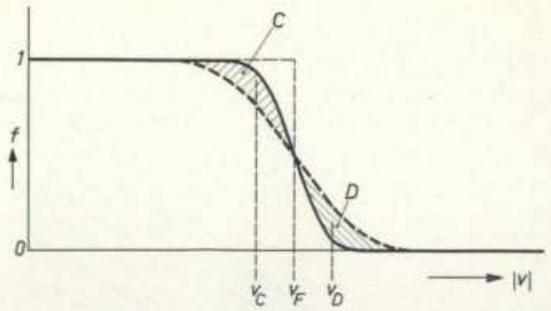


Fig. 9. Het Seebeck-effect in metalen. De bezettingsgraad f van de toestanden is voor twee temperaturen uitgezet als functie van de absolute waarde van de bijbehorende snelheid. v_F Fermisnelheid. Is er een temperatuurgradiënt, dan vertegenwoordigt het oppervlak C een overschot Δn_C van zich naar rechts, het oppervlak D een overschot Δn_D van zich naar links bewegende elektronen. v_C resp. v_D is de gemiddelde snelheid van de door C resp. D vertegenwoordigde elektronen. Als $\Delta n_C = \Delta n_D$, wordt de thermodiffusie en dus het Seebeck-effect bepaald door Δn_C en $(v_D - v_C)$.

Δn_D van elektronen met een gemiddelde snelheid v_D naar links. Als $\Delta n_C = \Delta n_D$, wordt de thermodiffusie (en daarmee het Seebeck-effect) bepaald door Δn_C en $v_D - v_C$; dit geeft een zeer gering effect. Aanzienlijk groter kan het effect worden als $\Delta n_C \neq \Delta n_D$ ten gevolge van een sterke gradiënt in de toestandsdichtheid.

Koelvermogen, temperatuurverlaging, rendement en kwaliteitsgetal

Het is duidelijk dat voor een goed Peltier-element de Peltier-coëfficiënt en dus, wegens (5), de Seebeck-coëfficiënt zo groot mogelijk moet zijn. Tevens moet het elektrische geleidingsvermogen zo groot mogelijk zijn maar het warmtegeleidingsvermogen zo klein mogelijk. Het zal blijken dat men de kwaliteit van een element door slechts één grootheid kan karakteriseren, en wel door het *kwaliteitsgetal* $Z = \alpha^2/RL$. Hierin is L het (parallel-)warmtegeleidingsvermogen van de twee armen samen, en R de elektrische (serie-)weerstand. Het kwaliteitsgetal Z heeft de dimensie $°C^{-1}$; voor de beste elementen heeft Z de waarde 2 à 3×10^{-3} $°C^{-1}$. Z wordt voornamelijk bepaald door de materiaaleigenschappen van de gebruikte halfgeleiders, nl. de Seebeck-coëfficiënt α, de elektrische geleidingscoëfficiënt σ en de warmtegeleidingscoëfficiënt λ; in grote lijnen is Z onafhankelijk van de dimensionering, aangezien de invloeden hiervan op R en L elkaar in het produkt RL compenseren. De precieze invloed van de dimensionering komt later nog ter sprake.

Het rendement η is de verhouding van het koelvermogen Q_K (de per seconde aan het te koelen voorwerp onttrokken warmte) tot het opgenomen elektrische vermogen N: $\eta = Q_K/N$. In de koudetechniek wordt η steeds als een belangrijke karakteristieke grootheid beschouwd. Met de thans bereikbare waarden voor Z kan het Peltier-element nog niet concurreren met de conventionele compressorkoelmachine, b.v. ten behoeve van een koelkast; daartoe zouden de waarden van Z minstens een factor 2 à 3 verbeterd moeten worden. Voor het Peltier-element bestaat er echter een groot toepassingsgebied waarbij de vraag naar een hoog rendement op de achtergrond treedt. Bij deze toepassingen is de maximaal bereikbare temperatuurverlaging vaak belangrijker als karakteristieke grootheid.

Tussen het koelvermogen Q_K en de temperatuurverlaging $\Delta T = T_W - T_K$ bestaat een nauw verband. Door het Peltier-effect moet namelijk aan het koude contact een hoeveelheid warmte afgevoerd worden die, afgezien van een deel van de ontwikkelde Joule-warmte, bestaat uit de aan het te koelen object onttrokken warmte Q_K en de warmte $L\Delta T$ die door warmtegeleiding vanaf het warme contact toestroomt. Bij een gegeven temperatuur T_W van de warme kant en bij een stroomsterkte I, ligt voor een gegeven Peltier-element de grootte van $Q_K + L\Delta T$ dus vast. In het navolgende zal nog blijken dat er voor elk element een bepaalde stroomsterkte is waarbij $Q_K + L\Delta T$ maximaal wordt; in het algemeen zal men het element bij deze stroomsterkte laten werken. Het koelvermogen Q_K is dus des te kleiner naarmate het temperatuurverschil ΔT groter is; voor $Q_K = 0$ (door thermische isolatie van het te koelen object van de omgeving) is de temperatuurverlaging maximaal. Omgekeerd heeft men bij een kleinere ΔT een grotere Q_K ter beschikking.

De afhankelijkheid van de stroomsterkte volgt uit de energiebalans aan het koude contact. In aanmerking genomen dat de helft van de Joule-warmte wordt afgevoerd bij het koude contact (de andere helft bij het warme contact), luidt de balans:

$$Q_K = \Pi_K I - \tfrac{1}{2} I^2 R - L\Delta T, \quad \ldots \quad (11)$$

of, met $\Pi_K = \alpha T_K$:

$$Q_K + L\Delta T = \alpha T_K I - \tfrac{1}{2} I^2 R. \quad \ldots \quad (12)$$

De spanning over het element is (zie ook verg. 2) $V = IR + \alpha\Delta T$; het elektrische vermogen is dus:

$$N = I^2 R + \alpha I \Delta T. \quad \ldots \quad (13)$$

We merken op dat in deze afleiding α, σ en λ tussen T_K en T_W als temperatuuronafhankelijk beschouwd worden. Uit (12) volgt direct dat, bij gegeven temperaturen, Q_K als functie van I een maximum heeft: voor kleine I neemt Q_K met I toe door de eerste term van het rechter lid, voor grotere I neemt Q_K weer af door de tweede term. De maximale waarde Q_M van Q_K bij gegeven ΔT, de waarde I_M van de stroomsterkte I waarbij deze bereikt wordt, en het bijbehorende elektrische vermogen N_M volgen uit (12, 13) en $\partial Q_K/\partial I = 0$:

$$Q_M + L\Delta T = \tfrac{1}{2} ZLT_K^2, \quad \ldots \quad (14)$$

$$I_M = \frac{\alpha T_K}{R}, \quad \ldots \quad (15)$$

$$N_M = ZLT_K T_W. \quad \ldots \quad (16)$$

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Hierin is Z het reeds genoemde kwaliteitsgetal:

$$Z = \alpha^2/LR. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (17)$$

Vergelijking (14) geeft dus voor een gegeven Peltier-element het maximale koelvermogen bij een gegeven temperatuurverschil en omgekeerd. Een grafische voorstelling van (14) waarin Q_K tegen ΔT is uitgezet — het koeldiagram — geeft een overzicht van de prestaties van een Peltier-element als koudepomp; hier gaan we straks nog iets verder op in. Eerst leiden we echter uit (14) nog een uitdrukking af voor de *maximaal bereikbare temperatuurverlaging* ΔT_0, een andere belangrijke grootheid voor een Peltier-element. Met $Q_M = 0$ volgt uit (14):

$$\Delta T_0 = T_W - T_0 = \tfrac{1}{2} Z T_0^2, \quad \ldots \quad (18)$$

waarin T_0 de laagst bereikbare temperatuur van de koude kant is. De waarde ΔT_0 van ΔT wordt bereikt voor $I = I_0 = \alpha T_0/R$, als $Q_K = 0$ is. Bij gegeven T_W is ΔT_0 blijkbaar geheel bepaald door Z. ΔT_0 is dus, evenals Z, in grote lijnen onafhankelijk van de dimensionering; de bijbehorende stroomsterkte I_0 wordt echter, bij gegeven T_W, α en σ, geheel door de dimensionering bepaald. Als men ΔT_0 ten opzichte van T_W verwaarlozen zou, dan zou ΔT_0 evenredig met Z zijn. *Fig. 10* toont een grafische voorstelling van ΔT_0 als functie van T_W volgens (18) voor enkele praktische waarden van Z.

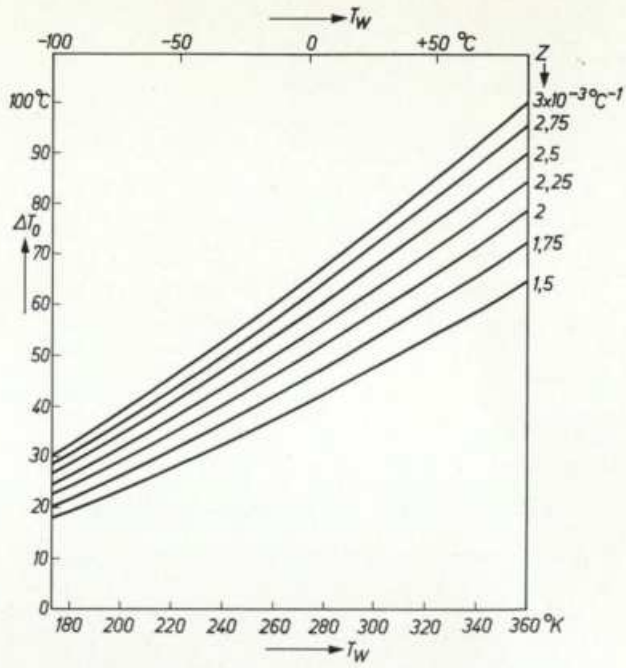


Fig. 10. De maximale temperatuurverlaging ΔT_0 als functie van de temperatuur van de warme kant T_W volgens vergelijking (18), voor enkele waarden van het kwaliteitsgetal Z.

In aansluiting op (18) en fig. 10 nog het volgende. In fig. 10 ziet men hoe ΔT_0 afneemt met afnemende T_W. Daardoor is het toepassen van Peltier-koeling bij lage uitgangstemperaturen, b.v. door voorkoeling met conventionele middelen of met behulp van een cascadeschakeling, onvoordelig. Uit (18) volgt dat niet alleen ΔT_0 maar ook de relatieve temperatuurverlaging $\Delta T_0/T_W$ kleiner wordt als T_W afneemt. Dit heeft ten gevolge dat men in de lagetemperaturenfysica in het algemeen geen toepassing van Peltier-koeling kan verwachten. Zou men b.v. een, onafhankelijk van de temperatuur veronderstelde, waarde van $Z = 3\times10^{-3}$ °C^{-1} bereikt hebben, dan zou men bij $T_W = 260$ °K een temperatuurverlaging $\Delta T_0 = 60$ °K kunnen realiseren, hetgeen technisch interessant is, maar bij $T_W = 10$ °K slechts de zeer oninteressante verlaging van 0,15 °K.

Het *koeldiagram* wordt bijzonder eenvoudig als men zich beperkt tot een lineaire benadering van (14) waarin ΔT ten opzichte van T_W wordt verwaarloosd. In deze benadering (zie *fig. 11*) volgt uit (14) met (16) en (18):

$$Q_M \approx \tfrac{1}{2} N_M \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta T_0}\right). \quad \ldots \quad (19)$$

Als men in (19) voor N_M de waarde voor $\Delta T = 0$ neemt: $N_M = ZLT_W^2$, dan is (19) een betere benadering dan men wellicht op grond van de kleinheid van ΔT vergeleken met T_W zou verwachten. De fout die men met (19) maakt, is 0 voor $\Delta T = 0$ en voor $\Delta T = \Delta T_0$; de maximale fout is 8,5 tot 10% voor $Z = 2$ tot 3×10^{-3} °C^{-1}. Deze nauwkeurigheid is in de praktijk ruimschoots voldoende.

Uit het bovenstaande volgt dat een Peltier-element bij een gegeven temperatuur van de warme kant T_W volledig wordt gekarakteriseerd door de maximale temperatuurverlaging ΔT_0, de stroomsterkte I_0 waarbij deze bereikt wordt en het daarvoor vereiste elektrische vermogen N_M (of de spanning over het element V_M). Deze gegevens kunnen bepaald worden met een eenvoudige proef, waarin men de stroomsterkte bij constante temperatuur van de warme kant zolang varieert tot zich een maximale temperatuurverlaging ingesteld heeft. Zijn deze gegevens bekend, dan kan men het maximale koelvermogen Q_M bij elke ΔT uit het diagram aflezen. De hoeveelheid warmte Q_W die aan de

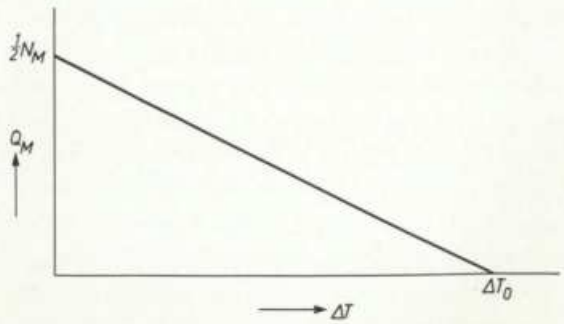


Fig. 11. Het koeldiagram volgens vergelijking (19): het maximale koelvermogen Q_M als functie van de temperatuurverlaging ΔT. ΔT_0 is de maximale temperatuurverlaging, N_M het opgenomen elektrische vermogen voor $\Delta T = 0$.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

warme kant afgevoerd moet worden, $Q_W = Q_M + N_M$ — een belangrijke grootheid bij het ontwerpen van de warmtewisselaars — is dan (evenals het rendement $\eta_M = Q_M/N_M$) ook bekend. Het verband tussen de grootheden, dat in het koeldiagram tot uitdrukking komt, maakt dus een calorimetrische meting van Q_M en Q_W overbodig.

De spanning die nodig is om de optimale stroomsterkte I_M, dus het maximale koelvermogen Q_M, in te stellen is:

$$V_M = I_M R + \alpha \Delta T = \alpha T_K + \alpha \Delta T = \alpha T_W.$$

Deze spanning is dus, als de halfgeleidercombinatie (d.w.z. α) gegeven is, alleen afhankelijk van de temperatuur van de warme kant T_W, niet van ΔT en evenmin van andere factoren zoals het kwaliteitsgetal of de dimensionering. Zo is b.v. voor van bismuttelluride afgeleide verbindingen algemeen $\alpha \approx 3{,}5 \times 10^{-4}$ V/°C; voor $T_W = 300$ °K is V_M dan $\approx 0{,}105$ volt.

In de praktijk schakelt men meestal een aantal Peltier-elementen tot een keten aaneen. Als men namelijk een bepaald koelvermogen onder bepaalde temperatuurcondities beoogt, dan kan men dit in principe nog over een willekeurig aantal elementen verdelen. De optimale stroomsterkte is daarbij omgekeerd evenredig met het aantal elementen, aangezien het koelvermogen en dus het elektrische vermogen per element omgekeerd evenredig is met dit aantal, maar de spanning over een element er onafhankelijk van is. Uit (15) volgt dan dat de bijbehorende weerstand per element, dus de verhouding lengte/doorsnede van elke arm, evenredig is met het aantal elementen. De spanning over de hele keten is ook evenredig met dit aantal. De keuze die men maakt zal afhangen van verschillende technische gegevens, zoals de plaats die voor de elementen beschikbaar is, de oppervlakte van de warmtecontactplaatsen en de aard van de te gebruiken stroombron.

Het is duidelijk dat het koeldiagram van fig. 11 en vergelijking (19) ook geldig zijn voor ketens van elementen en Peltier-batterijen, indien men onder Q_M en N_M het *totale* maximale koelvermogen en het bijbehorende *totale* elektrische vermogen verstaat.

Fig. 12 geeft als voorbeeld de koeldiagrammen van drie typen van Peltier-batterijen. Deze zijn getekend voor $T_W = 300$ °K. Ze kunnen echter ook voor andere temperaturen T_W' van de warme kant worden gebruikt. Daartoe behoeft men slechts de op de ordinaat aangegeven waarden (volgens (14) en (16) met $T_K = T_W$) te vermenigvuldigen met $(T_W'/T_W)^2$; de waarde van ΔT_0 die bij T_W' behoort, kan uit fig. 10 afgelezen worden.

Omdat bij de huidige toepassingen de vraag naar de grootte van het rendement minder belangrijk is, hebben we deze tot nu toe buiten beschouwing gelaten. Toch blijft het steeds interessant

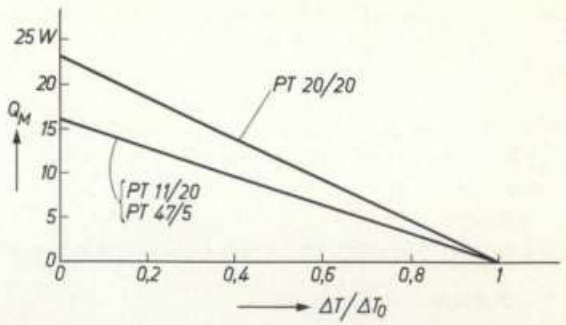


Fig. 12. Het koeldiagram van drie typen van Peltier-batterijen. Het maximale koelvermogen Q_M als functie van de temperatuurverlaging ΔT gedeeld door de maximale temperatuurverlaging ΔT_0, voor $T_W = 20$ °C en $\Delta T_0 = 50$ °C voor de types:
PT 20/20 bij $I_M = 20$ A, $V_M \approx 2{,}0$ V,
PT 11/20 bij $I_M = 20$ A, $V_M \approx 1{,}1$ V,
PT 47/5 bij $I_M = 5{,}5$ A, $V_M \approx 4{,}7$ V.

welk rendement men kan bereiken, en deze vraag zou weer zeer belangrijk worden als men b.v. materialen met grotere Z-waarden zou ontwikkelen.

Het maximale rendement bij gegeven T_W en ΔT (of Q_K) vindt men uit $\partial\eta/\partial I = 0$ met $\eta = Q_K/N$ en (12) en (13):

$$\eta_0 = \frac{MT_K - T_W}{\Delta T(M+1)}, \quad \ldots\ldots \quad (20)$$

waarin

$$M = \sqrt{1 + \frac{Z}{2}(T_W + T_K)}. \quad \ldots\ldots \quad (21)$$

Bij gegeven T_W en T_K is dus ook het maximale rendement η_0 alleen door Z bepaald; η_0 is een monotoon toenemende functie van Z. In *fig. 13* is η_0 uitgezet als functie van ΔT voor $T_W = 300$ °K en voor enkele waarden van Z. Er zij nog op gewezen dat η niet is beperkt tot waarden tussen 0 en 1, maar in principe alle waarden tussen 0 en ∞ kan aannemen. Als men η als maat voor de „kwaliteit" van een Peltier-element wil gebruiken, speciaal ter vergelijking met andere koudepompen, dan moet men in het oog houden bij welk temperatuurverschil deze vergelijking gemaakt wordt. Kiest men b.v. $\Delta T = \Delta T_0$, dan is $Q_K = 0$ en dus $\eta = 0$; dit geldt echter voor elke koudepomp. Van essentieel belang bij dergelijke vergelijkingen is ook het koelvermogen waarvoor de

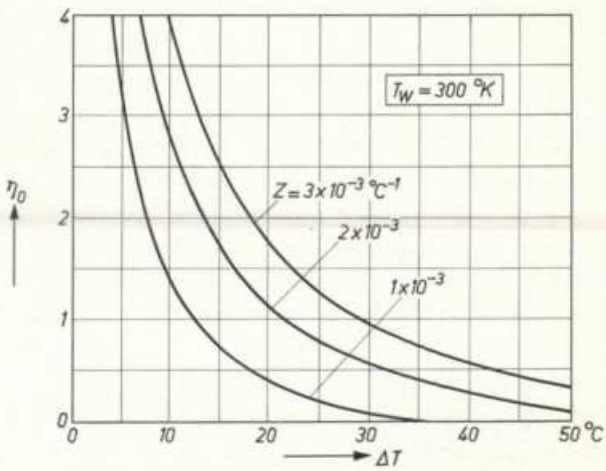


Fig. 13. Het maximale rendement η_0 als functie van de temperatuurverlaging ΔT voor verschillende waarden van het kwaliteitsgetal Z. De temperatuur van de warme kant is hier $T_W = 300$ °K.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

koudepomp ontworpen is. Het rendement van een Peltier-element is daar namelijk niet van afhankelijk, terwijl b.v. het rendement van een conventionele compressorkoelmachine snel afneemt als het nominale koelvermogen kleiner wordt. Een economische vergelijking kan dus alleen gemaakt worden aan de hand van gedetailleerde technische gegevens van de koudepompen in kwestie.

Keuze en ontwikkeling van thermo-elektrische materialen

Het materiaal-kwaliteitsgetal

Hoewel het kwaliteitsgetal $Z = \alpha^2/RL$ (verg. 17) hoofdzakelijk wordt bepaald door de thermo-elektrische eigenschappen van de gebruikte stoffen, hangt het toch nog enigszins af van de afmetingen van het Peltier-element. Door een geschikte keuze van deze afmetingen, die via de noemer RL de waarde van Z beïnvloeden, kan men bij gegeven materialen Z maximaal maken. Aangezien de twee armen van het element elektrisch in serie maar wat het warmtetransport betreft parallel geschakeld zijn, is:

$$RL = \left(\frac{l_N}{\sigma_N q_N} + \frac{l_P}{\sigma_P q_P}\right)\left(\frac{\lambda_N q_N}{l_N} + \frac{\lambda_P q_P}{l_P}\right),$$

waarin l_N, l_P de lengten, q_N, q_P de doorsneden, σ_N, σ_P de elektrische en λ_N, λ_P de warmte-geleidingscoëfficienten van de N- en de P-geleider zijn. De geometrische grootheden komen nu alleen voor in de combinatie:

$$g = \frac{l_P}{l_N}\,\frac{q_N}{q_P},$$

zodat
$$RL = \frac{\lambda_N}{\sigma_N} + \frac{\lambda_P}{\sigma_P} + g\,\frac{\lambda_N}{\sigma_P} + \frac{1}{g}\,\frac{\lambda_P}{\sigma_N}. \quad . \quad . \quad (22)$$

Deze uitdrukking wordt minimaal voor:

$$g = \sqrt{\frac{\sigma_P}{\sigma_N}\,\frac{\lambda_P}{\lambda_N}};$$

de bijbehorende maximale waarde z van Z is:

$$z = \left[\frac{\alpha_P - \alpha_N}{\sqrt{\lambda_N/\sigma_N} + \sqrt{\lambda_P/\sigma_P}}\right]^2. \quad . \quad . \quad . \quad (23)$$

Op deze wijze heeft men als criterium voor de mogelijke prestaties van een halfgeleidercombinatie een kwaliteitsgetal verkregen dat alleen door de materiaaleigenschappen van de halfgeleiders bepaald wordt. Dit kwaliteitsgetal werd in principe reeds door Altenkirch [2] afgeleid. Het is het meest gebruikte criterium, hoewel er ook nog andere in gebruik zijn.

Als maat voor de thermo-elektrische kwaliteit van een enkele stof wordt eveneens een kwaliteitsgetal gebruikt, namelijk:

$$z_N = \alpha_N^2\sigma_N/\lambda_N \quad \text{en} \quad z_P = \alpha_P^2\sigma_P/\lambda_P \quad . \quad . \quad (24)$$

voor resp. N- en P-materiaal. Hoewel men niet uit (24) samen met (23) het kwaliteitsgetal van een volledig element ondubbelzinnig kan berekenen, is het gebruik van (24) in de praktijk toch wel gerechtvaardigd, omdat α en σ/λ voor de twee gebruikte materialen bijna steeds in absolute waarde vrijwel gelijk zijn, en tevens α_N en α_P tegengesteld teken hebben. Dan volgt uit (23): $z \approx z_N \approx z_P$.

Eigenlijk moeten in vergelijking (22) nog de ohmse contactweerstanden van het element in rekening gebracht worden. In de praktijk is echter gebleken dat de contactweerstanden, en ook het feit dat de afmetingen van het element met het oog op de produktie niet geheel optimaal gekozen worden, bij in serie geproduceerde Peltier-elementen een verwaarloosbare invloed hebben. Zodoende geeft (23) in alle praktijkgevallen het effectieve kwaliteitsgetal voor het volledige Peltier-element, dat dus alleen door de thermo-elektrische materiaaleigenschappen bepaald wordt.

Halfgeleidereigenschappen en materiaal-kwaliteitsgetal

Bij het zoeken naar geschikte materialen voor thermo-elektrische toepassingen zal men uitgaan van de eis dat het kwaliteitsgetal $z = \alpha^2\sigma/\lambda$ zo groot mogelijk moet zijn. Het is niet mogelijk om op zuiver theoretische gronden een betrouwbare keuze te maken, maar de volgende beschouwingen kunnen als richtlijn dienen. In de praktijk is daarenboven steeds nog een grote hoeveelheid empirie onmisbaar.

Bij de schatting van het kwaliteitsgetal voor verschillende materialen speelt de ladingdragersconcentratie n een belangrijke rol. De situatie is zeer schematisch weergegeven in *fig. 14*, waarin α, σ, $\alpha^2\sigma$ en λ zijn uitgezet tegen n. Met toenemende n neemt α af (ten gevolge van toenemende ontaarding, zie blz. 4), σ

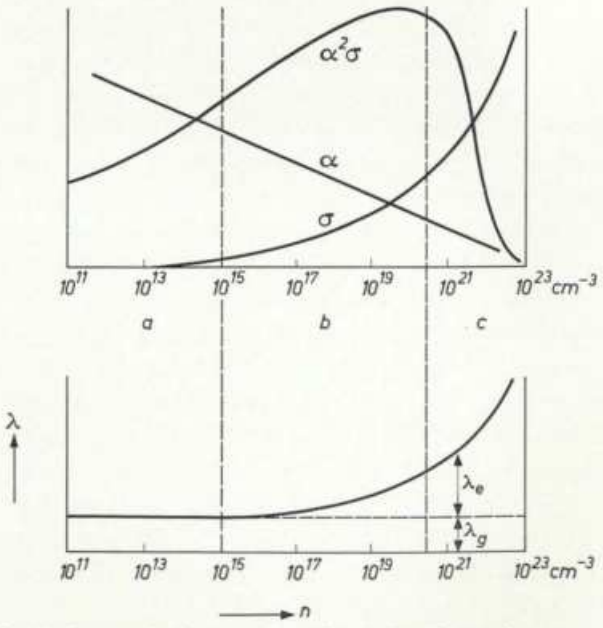


Fig. 14. De grootheden α, σ, λ en $\alpha^2\sigma$ als functie van de concentratie n van de ladingdragers, zeer schematisch. *a* isolatoren; *b* halfgeleiders; *c* metalen. λ_g resp. λ_e zijn de bijdragen tot λ ten gevolge van de rooster- resp. de elektronenwarmtegeleiding.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

neemt toe ($\sigma = ne\mu$, waarin μ de beweeglijkheid van de ladingdragers is), en $\alpha^2\sigma$ heeft een maximum, dat voor alle halfgeleiders in de buurt van $n = 10^{19}$ cm^{-3} ligt. De warmtegeleiding is de som van roosterwarmtegeleiding en elektronenwarmtegeleiding: $\lambda = \lambda_g + \lambda_e$. In halfgeleiders is bijna steeds $\lambda_e \ll \lambda_g$, zodat men λ_e ten opzichte van λ_g in eerste benadering verwaarlozen kan. Aangezien λ_g onafhankelijk van n is, heeft ook z een maximum bij $n \approx 10^{19}$ cm^{-3}.

In metalen speelt λ_e de hoofdrol. Daardoor is σ/λ constant (wet van Wiedemann-Franz), dus z evenredig met α^2. Door de relatief lage waarden van α in metalen, blijven ook de daarmee bereikbare waarden van z zeer laag. Dat het zoeken naar geschikte stoffen voor thermo-elektrische toepassingen tot voor enkele jaren geen resultaat had, was daaraan te wijten dat de gezichtskring toen bijna uitsluitend tot de metalen beperkt was.

De gegeven gedachtegang die bij de halfgeleiders leidt tot een maximum van z bij $n = 10^{19}$ cm^{-3}, is niet geheel correct. Weliswaar wordt de optimale concentratie van 10^{19} cm^{-3} bereikt in het halfgeleidergebied, maar deze concentratie is zo hoog dat het elektronengas in de halfgeleider sterk ontaard is. Daardoor zijn de vergelijkingen (9) en (10) niet meer geldig, terwijl tevens de gemiddelde beweeglijkheid μ van de concentratie afhankelijk wordt. Brengt men dit in rekening, dan heeft in sommige gevallen $\alpha^2\sigma$ zelfs geen maximum meer. Merkwaardig genoeg zorgt dan het elektronische deel van de warmtegeleiding λ_e ervoor dat $\alpha^2\sigma/\lambda$ toch een maximum heeft [3], en zelfs weer voor $n \approx 10^{19}$ cm^{-3}.

In tweeërlei opzicht is het een gunstige omstandigheid dat de optimale waarde van n in de buurt van 10^{19} cm^{-3} ligt. Ten eerste ligt deze waarde in het halfgeleidergebied, en juist in dit gebied kan men de optimale concentratie van ladingdragers *instellen* door doteren. In de praktijk moet de precieze optimale dotering experimenteel bepaald worden. Ten tweede is de vereiste dotering van ca. 10^{19} cm^{-3} reeds zo groot dat het geen zin heeft voor de uitgangsmaterialen een veel grotere chemische zuiverheid (bij ongeveer 10^{23} atomen of moleculen per cm^3) te eisen dan omstreeks $10^{19}/10^{23} = 10^{-2}$ %. Aan deze eis wordt meestal door de uitgangsmaterialen van handelskwaliteit al voldaan, zodat het niet nodig is — zoals b.v. bij Ge en Si voor transistors, waar de concentratie ongeveer 10^{16} cm^{-3} moet zijn — de chemische verontreinigingsgraad door zonesmelten tot ca. 10^{-5} % te reduceren.

Thans rest nog de vraag: welke halfgeleiders hebben, bij de optimale dotering, het grootste kwaliteitsgetal? Stel α_{opt} en σ_{opt} zijn de waarden van α en σ bij de optimale concentratie van ladingdragers n_{opt}. Volgens enigszins vereenvoudigde theoretische beschouwingen is α_{opt} onafhankelijk van de speciale halfgeleidereigenschappen: $\alpha_{opt} \approx 2k/e$ (= 172 μV/°C); in de praktijk is $\alpha_{opt} \approx 200$ à 300 μV/°C. Voor σ_{opt} geldt $\sigma_{opt} = n_{opt}e\mu$. De optimale concentratie n_{opt} is zelf afhankelijk van de structuur van de desbetreffende band, die verband houdt met de effectieve massa van de ladingdragers m^*; theoretisch is $n_{opt} \sim m^{*\,3/2}$. Uit (24) volgt nu dat het maximale kwaliteitsgetal evenredig is met $\mu m^{*\,3/2}/\lambda_g$. Dit is dus ook een soort kwaliteitsgetal. Tussen de verschillende hierin optredende grootheden bestaat een gecompliceerde wederzijdse afhankelijkheid. Zo is er b.v. een tendens te bespeuren dat μ/λ_g met toenemend atoomgewicht toeneemt, zodat halfgeleiders met een hoog gemiddeld atoomgewicht in het algemeen beter geschikt zijn dan lichtere verbindingen. De van bismuttelluride afgeleide verbindingen, die tot nog toe de beste thermo-elektrische materialen zijn, hebben inderdaad een hoog gemiddeld atoomgewicht. Anderzijds is het b.v. mogelijk de roosterwarmtegeleidingscoëfficiënt λ_g te verlagen door het maken van *mengkristallen*. De roostergolven worden namelijk sterk verstrooid als het rooster uit onregelmatig verdeelde atomen van sterk verschillende massa's bestaat. De elektronische structuur moet daarbij zo weinig mogelijk veranderen, en in het bijzonder mag de beweeglijkheid er niet kleiner door worden. De mengkristallen moeten dus legeringen zijn van chemisch nauw verwante verbindingen met analoge valenties en van elementen met zo verschillend mogelijke atoomgewichten. Voor de beste kristalmengverhouding is niet altijd de roosterwarmtegeleiding alleen bepalend. Door deze verhouding wordt ook de effectieve massa m^* beïnvloed, die b.v. bij bismuttelluride en de daarmee isomorfe verbindingen een maximum heeft bij een andere verhouding dan waarbij de roosterwarmtegeleiding minimaal wordt. De beste kristalmengverhouding moet in de praktijk experimenteel bepaald worden.

Bereiding en eigenschappen van halfgeleiders afgeleid van bismuttelluride

De halfgeleidermaterialen waarmee men de grootste kwaliteitsgetallen bereikt heeft en die algemeen gebruikt worden voor Peltier-elementen, zijn bismuttelluride Bi_2Te_3 en de mengkristallen daarvan met de isomorfe verbindingen bismutselenide Bi_2Se_3 en antimoontelluride Sb_2Te_3. Deze kristallen zijn romboedrisch. De mengkristallen met Bi_2Se_3, die met b.v. I of Br gedoteerd zijn, worden gebruikt als *N*-materiaal, terwijl de met b.v. Pb gedoteerde mengkristallen met Sb_2Te_3 het *P*-materiaal vormen. De kristalstructuur kan men beschouwen als een hexagonale lagenstructuur waarin de, elk uit één atoomsoort bestaande, lagen gerangschikt zijn in de volgorde $\ldots Te^{[I]} - |Te^{[I]} - Bi - Te^{[II]} - Bi - Te^{[I]} - |\, Te^{[I]} \ldots$. Deze kristallen splijten heel gemakkelijk, waarschijnlijk door de zwakke binding tussen de $Te^{[I]}$-lagen. Het splijtvlak staat loodrecht op de *c*-as.

[2] E. Altenkirch, Phys. Z. **10**, 560, 1909 en **12**, 920, 1911.
[3] J. D. Wasscher, W. Albers en C. Haas, Solid-state electronics **6**, 261, 1963.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het halfgeleidende materiaal wordt in het algemeen bereid volgens een van de volgende twee methodes. a) De smeltmethode, waarbij men de smelt gericht laat stollen volgens de „normal-freezing" (of Bridgman-) methode — dit om barsten en gietgallen te vermijden en zo goed mogelijk een monokristal te krijgen. b) De sintermethode, waarbij de van te voren gesmolten verbindingen gemalen, gezeefd, geperst en ten slotte gesinterd worden. In het vervolg zullen we kortweg spreken van *getrokken* dan wel *gesinterd* materiaal.

Een moeilijkheid bij de verwerking van het getrokken materiaal is zijn broosheid ten gevolge van de gemakkelijke splijtbaarheid van de kristallen. Dit is in veel mindere mate het geval met gesinterd materiaal, dat mechanisch sterker is; het heeft echter een wat kleiner kwaliteitsgetal. Dit laatste hangt samen met de anisotropie van de thermo-elektrische eigenschappen als gevolg van de gelaagde structuur van het materiaal. Terwijl de thermospanningen parallel (||) aan het splijtvlak en loodrecht (⊥) erop nauwelijks zijn te onderscheiden, zijn de elektrische geleiding en de warmtegeleiding evenwijdig aan het splijtvlak groter dan die loodrecht erop. Daarbij geldt experimenteel: $(\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp})_{N,P} > (\lambda_{\parallel}/\lambda_{\perp})_{N,P}$. Voor de in het kwaliteitsgetal voorkomende verhouding σ/λ geldt dus $(\sigma_{\parallel}/\lambda_{\parallel})_{N,P} > (\sigma_{\perp}/\lambda_{\perp})_{N,P}$, zodat $(z_{\parallel})_{N,P} > (z_{\perp})_{N,P}$. Daarom hebben de van getrokken materiaal gemaakte Peltier-elementen, waarin de splijtvlakken evenwijdig aan de stroomrichting georiënteerd zijn, een beter kwaliteitsgetal dan de elementen van gesinterd materiaal, waarin de kristallieten willekeurig georiënteerd maar gelijkmatig verdeeld liggen. In *fig. 15* is de gemeten maximaal bereikbare temperatuurverlaging ΔT_0 als functie van de temperatuur T_W van de warme kant uitgezet voor Peltier-elementen zowel van getrokken als van gesinterd materiaal. Met behulp van de krommen voor constant kwaliteitsgetal (volgens verg. 18) kan men hieruit het kwaliteitsgetal aflezen dat in de praktijk bij een willekeurige uitgangstemperatuur optreedt. Dan is dus ook de temperatuurafhankelijkheid van de thermo-elektrische eigenschappen verdisconteerd, die overigens in het gemeten temperatuurinterval relatief van weinig invloed is op het kwaliteitsgetal. Wat de desbetreffende metingen betreft, zij nog opgemerkt dat naast het vermijden van extra-warmtegeleidingsverliezen door evacuatie, ook stralingsverliezen voorkomen werden door de meetapparatuur tot op enkele °C boven de temperatuur van de koude kant van het Peltier-element af te koelen.

Bij de van bismuttelluride afgeleide halfgeleiders is zowel de beste kristalmengverhouding als ook de optimale dotering niet erg kritisch. Dit is waarschijnlijk de oorzaak van het enigszins verrassende feit dat de kwaliteitsgetallen van *in serie geproduceerde* Peltier-

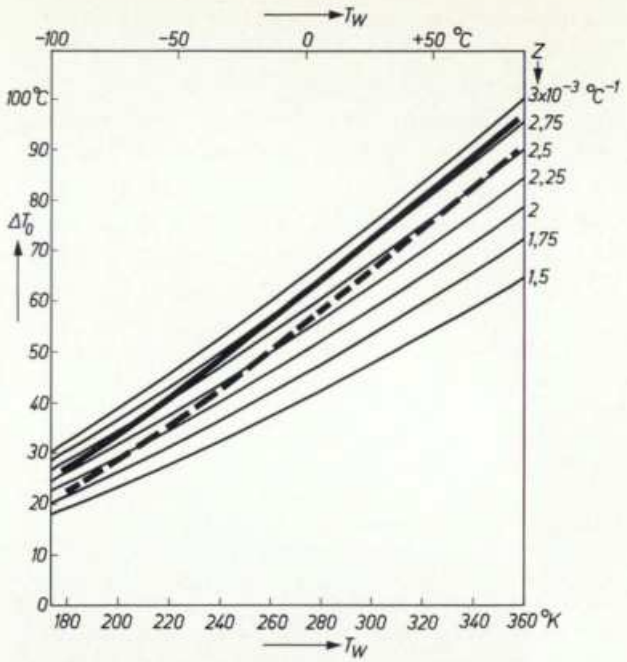


Fig. 15. De maximale temperatuurverlaging ΔT_0 als functie van de temperatuur van de warme kant T_W voor Peltier-elementen vervaardigd van halfgeleidermateriaal afgeleid van bismuttelluride. De getrokken lijn betreft het getrokken materiaal, de onderbroken lijn het gesinterde. De krommen voor constant kwaliteitsgetal van fig. 10 zijn ter vergelijking ook weergegeven.

elementen van een aantal fabrikanten, bij alle waarden van T_W tussen ongeveer −90 en +100 °C, onderling zeer weinig (omstreeks 1 %) verschillen; dit ondanks de ongetwijfeld verschillende doteringen en kristalmengverhoudingen die zijn toegepast. Deze fabrikanten hebben blijkbaar het maximaal bereikbare kwaliteitsgetal vrijwel bereikt. Dit geldt voor elementen van getrokken materiaal. Voor elementen van gesinterd materiaal geldt hetzelfde, maar hierbij zijn de kwaliteitsgetallen, zoals gezegd, iets kleiner. De krommen in fig. 15 zijn representatief voor deze kwaliteitsgetallen, die men dus de standaard-kwaliteitsgetallen voor van bismuttelluride afgeleide Peltier-elementen zou kunnen noemen. Deze zijn bij $T_W \approx 300$ °K (kamertemperatuur) voor elementen van getrokken materiaal ca. $2{,}8\times10^{-3}$ °C^{-1}, en van gesinterd materiaal ca. $2{,}4\times10^{-3}$ °C^{-1}. Het verschil in kwaliteitsgetal tussen gesinterd en getrokken materiaal is voor de praktijk van geen belang. Het gaat hier over kwaliteitsgetallen van het volledige Peltier-element en niet over die van de aparte van bismuttelluride afgeleide materialen, waarvoor men vaak topwaarden aangegeven vindt (b.v. $2{,}8\times10^{-3}$ °C^{-1} voor *N*-materiaal en $3{,}5\times10^{-3}$ °C^{-1} voor *P*-materiaal) die in principe hogere kwaliteitsgetallen voor elementen zouden kunnen geven. De krommen van fig. 15 mogen niet geëxtrapoleerd worden, daar het zeer wel mogelijk is dat reeds direct buiten het aangegeven gebied de kwaliteitsgetallen aanzienlijk dalen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Indien van Peltier-elementen of van ketens van elementen volledige Peltier-batterijen worden gemaakt met dekplaten, plastiekdozen, enz. (of als de elementen worden ingegoten in kunststof), kunnen er extra-warmtegeleidingsverliezen optreden, die het „effectieve kwaliteitsgetal" van de batterij reduceren. Deze reductie kan wel 20% bedragen.

De voedingsstroom van het Peltier-element

De gelijkstroom waarmee men een Peltier-batterij voedt, heeft in de praktijk vaak een rimpel, die in principe de prestatie verlaagt. Met een toenemende rimpel wordt de verhouding van de gemiddelde waarde van de stroom tot de effectieve waarde kleiner; het gemiddelde is bepalend voor het Peltier-effect, de effectieve waarde voor de Joule-warmte. Dikwijls wordt de daardoor veroorzaakte prestatievermindering overschat en veronderstelt men dat ten aanzien van de rimpel aan de stroom hoge eisen moeten worden gesteld. De berekening van de invloed van de rimpel, die we hier achterwege zullen laten, en die ook gemakkelijk door metingen bevestigd kan worden, leert echter dat er door een rimpel slechts een geringe achteruitgang van b.v. het maximale koelvermogen of de maximale temperatuurverlaging optreedt. Het kwaliteitsgetal wordt bij gebruik van een gerimpelde gelijkstroom *schijnbaar* met de factor $1/(1 + w)^2$ gereduceerd, waarin w de rimpelfactor (effectieve waarde van de rimpel gedeeld door de gemiddelde totale stroomsterkte) is. De invloed van de rimpel op b.v. de maximaal bereikbare temperatuurverlaging ΔT_0 kan daaruit met (18) berekend worden; in *fig. 16* is de relatieve vermindering van ΔT_0 als functie van w uitgezet. Omdat de vermindering slechts weinig van Z afhangt, werd deze alleen voor $Z = 2{,}5 \times 10^{-3}$ °C^{-1} getekend.

Als voorbeeld kiezen we een gelijkstroom waarop een sinusgolf gesuperponeerd is (zie *fig. 17a*). De rimpelfactor is $w = I_\sim/I_m\sqrt{2}$. Als nu b.v. de verhouding van $I_\sim$ tot I_m ongeveer $\frac{1}{4}$ is, waarbij een w van ongeveer 18% hoort, dan is de vermindering van de maximaal bereikbare temperatuurverlaging slechts 2%! Als volgend voorbeeld kiezen we nog een gelijkgerichte wisselstroom zoals die door een gewone gelijkrichtschakeling zonder afvlakfilters geleverd wordt. De rimpelfactor van deze stroom (zie fig. 17*b*), die uit een willekeurig aantal sinusimpulsen kan bestaan, is, uitgedrukt in het aantal stroomimpulsen p per periode:

$$w = \frac{\pi}{p \sin \pi/p} \sqrt{\tfrac{1}{2} + \frac{p}{4\pi} \sin \frac{2\pi}{p} - \left(\frac{p}{\pi}\right)^2 \sin^2 \frac{\pi}{p}}. \quad (25)$$

De hiermee berekende waarden van w voor enkele veel gebruikte gelijkrichtschakelingen zijn hieronder aangegeven.

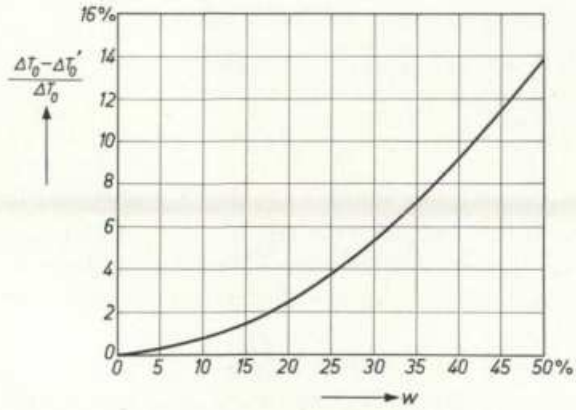


Fig. 16. De relatieve vermindering $(\Delta T_0 - \Delta T_0')/\Delta T_0$ van de maximale temperatuurverlaging als functie van de rimpelfactor w van de voedingsstroom voor $Z = 2{,}5 \times 10^{-3}$ °C^{-1}. $\Delta T_0'$ resp. ΔT_0 is de maximaal bereikbare temperatuurverlaging voor een rimpelfactor w resp. 0.

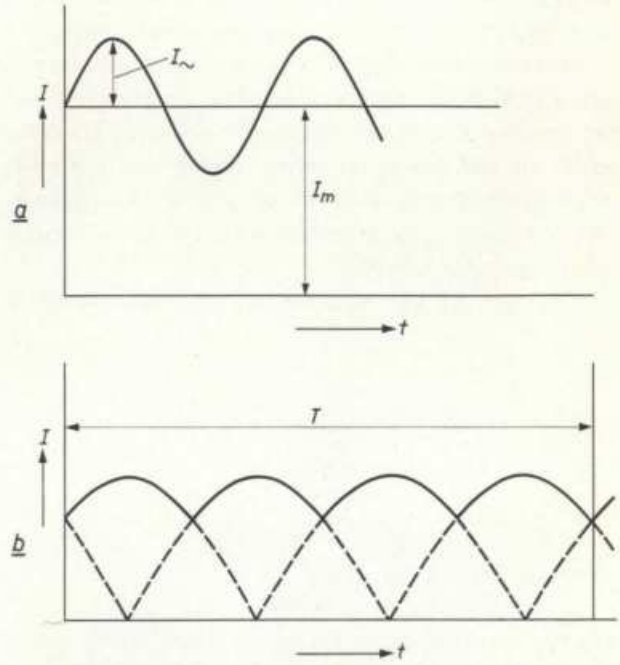


Fig. 17. Voorbeelden van een gelijkstroom met rimpel. *a*) Sinusvormig gemoduleerde gelijkstroom. I_m gemiddelde stroomsterkte. $I_\sim$ amplitude van de sinusgolf. *b*) Gelijkgerichte wisselstroom die bestaat uit vier sinusimpulsen.

p	w in %	type gelijkrichtschakeling
2	48,2	enkelfazig dubbelzijdig, brugschakeling
3	18,3	sterschakeling
4	9,8	—
6	4,2	driefazig dubbelzijdig, zesfazig enkelzijdig
8	2,4	—
12	1,0	—

Uit deze waarden, samen met fig. 16, blijkt dat ook met een eenvoudige gelijkrichtschakeling zonder uitgebreide afvlakfilters de met zuivere gelijkstroom bereikbare prestatie goed benaderd kan worden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De Peltier-batterij in de praktijk: constructie en toepassingen

Peltier-elementen zijn bijzonder geschikt voor het koelen van kleine voorwerpen waarvoor maar een klein koelvermogen nodig is, en voor het stabiliseren van de temperatuur van dergelijke voorwerpen. Als voorbeelden noemen we: preparaten bij fysisch-chemisch of biologisch-medisch laboratoriumwerk, waarbij het meestal slechts om kleine hoeveelheden materiaal gaat, en temperatuurgevoelige onderdelen van meetapparaten. *Fig. 18* toont enkele eenvoudige toepassingen, die als praktische hulpmiddelen bij laboratoriumonderzoek zijn bedoeld.

Voor dergelijke toepassingen kan een willekeurig groot aantal Peltier-elementen worden samengevoegd tot een batterij met een overeenkomstig willekeurig groot koelvermogen. Bovendien kan de batterij qua vorm in hoge mate aan het koelobject of aan een gegeven opstelling (b.v. als inschuifbare eenheid) worden aangepast.

Een belangrijk voordeel van deze zuiver elektrische koelmethode vergeleken met b.v. een vloeistofbad of een compressorkoelmachine, is de continue en nauwkeurige regelbaarheid via de voedingsstroom, waardoor de temperatuur bijzonder goed constant kan worden gehouden. Bovendien kan men het object snelle temperatuurvariaties of een voorgeschreven temperatuurcyclus laten doorlopen, aangezien het element, als men de stroom omkeert, warmte aan het object toevoert.

In *fig. 19* zijn de Peltier-batterijen type PT 20/20 en PT 11/20 afgebeeld, die werken bij een stroom van 20 A en een spanning van ongeveer 2 resp. 1,1 V (het eerste getal in het typenummer is het aantal elementen). Om de moeilijkheden te vermijden die aan het leveren van zulke sterke stromen verbonden zijn, werd ook het type PT 47/5 ontwikkeld, dat voor 5,5 A, 4,7 V is ontworpen en hetzelfde koelvermogen heeft als de PT 11/20.

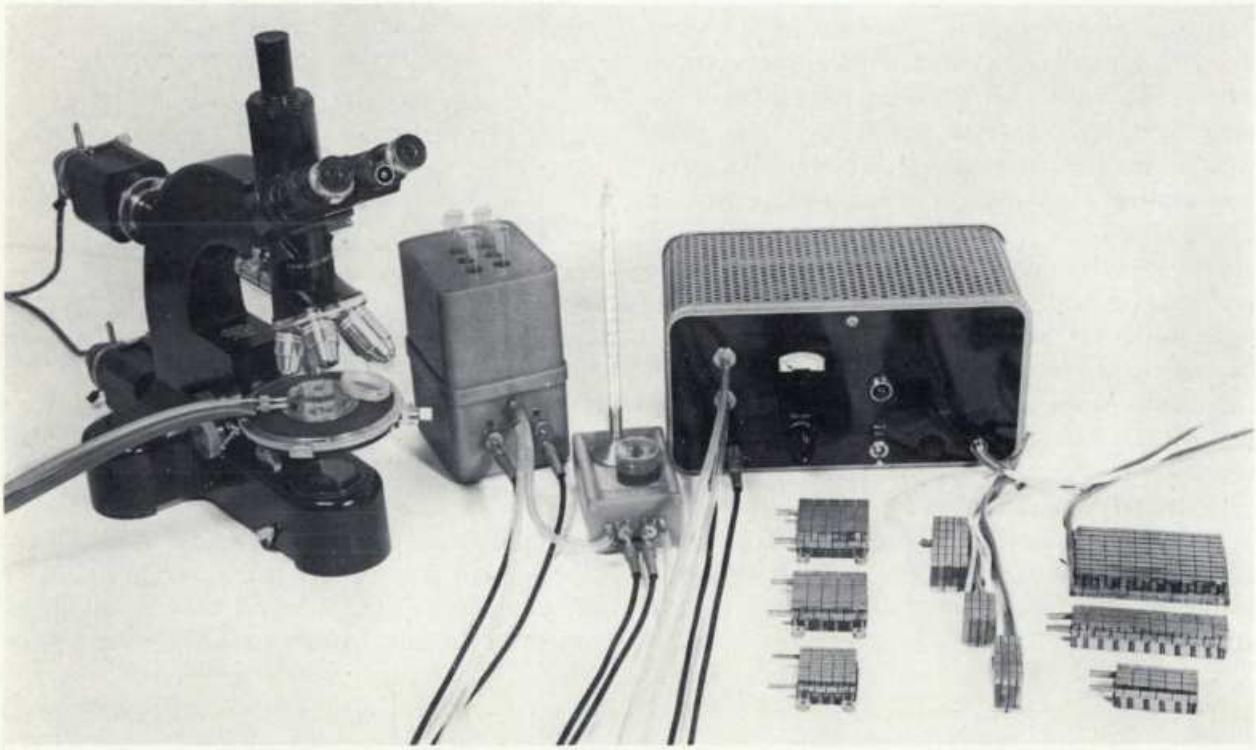


Fig. 18. Peltier-koelapparaten voor laboratoriumtoepassingen. De afbeelding toont een preparaatkoeltafel met thermometer, een reageerbuiskoeler en een in een microscoop gemonteerd koel- en verwarmingsapparaat met regelbare gelijkstroombron. De gedeeltelijk met vloeistof gekoelde Peltier-batterijen rechts vooraan zijn laboratoriumexemplaren van verschillende dimensionering, bestaande uit 12, 20, 30, 40 of 100 elementen.

De ontwikkelde warmte kan bij Peltier-batterijen het beste afgevoerd worden met behulp van vloeistofkoeling. De in een plastieken omhulling ingebouwde types zijn daartoe van een koelmantel voorzien. De schroefgaten in deze uitvoeringen dienen om de bevestiging aan het koelobject te vergemakkelijken.

Als voorbeeld van een met lucht gekoelde Peltier-batterij laat *fig. 20* een uitvoering zien die, ten behoeve van een effectieve luchtkoeling, sterk van de gebruikelijke vorm afwijkt. Om de warmtegeleidingsweg kort te houden, is elk metalen verbindingsstuk van de warme

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

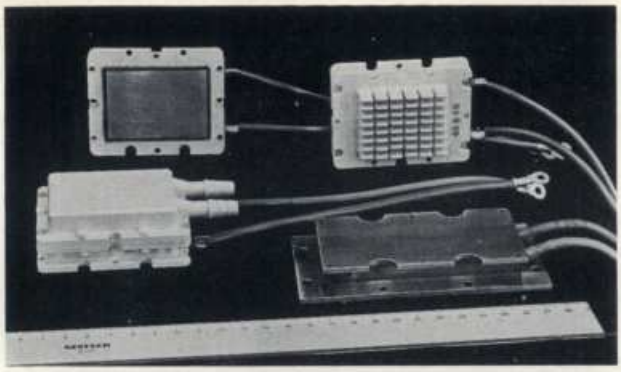


Fig. 19. De Peltier-batterijen types PT 20/20 en, in lichte plastieken doos, PT 11/20 en PT 47/5. De ontwikkelde warmte wordt via de koelribben met een door de koelmantel stromende vloeistof afgevoerd. De koude kant kan in plaats van met een koperplaat als warmtecontact ook worden uitgevoerd met koelribben, om een vloeistof of een gas te koelen.

kant uitgevoerd als een blok met 24 koelribben in de vorm van koperlamellen van $5 \times 11 \times 0{,}2$ mm op onderlinge afstanden van 0,2 mm. Door de elementen in een kring om een radiaal blazende ventilator te plaatsen, kunnen een betrekkelijk groot aantal elementen door één ventilator worden gekoeld, waarbij de koellucht toch slechts door telkens één element stroomt, zodat geen enkel element met reeds verwarmde lucht wordt geventileerd. Met deze constructie kan in een ringbatterij van 20 elementen de ontwikkelde warmte, die afhankelijk van het temperatuurverschil tussen warme en koude kant 45 à 60 watt bedraagt, worden afgevoerd met een temperatuurverhoging van slechts 3 tot 6 °C van de warme kant ten opzichte van de lucht in de omgeving.

In fig. 18 zijn enkele eenvoudige kleine thermostaten afgebeeld, die voldoen als men aan de constantheid van de temperatuur niet erg hoge eisen stelt. Een van de thermostaten is een koeler voor reageerbuisjes, bestaande uit een aluminiumblok met boringen voor de reageerbuisjes; aan dit blok zijn enkele Peltier-batterijen bevestigd. De andere thermostaat is een koeltafel voor bekerglazen e.d. Met behulp van een thermometer in een van de boringen van de reageerbuiskoeler, dan wel in een aparte metalen voet op de koeltafel, kunnen met deze apparaten, afhankelijk van de temperatuur van het koelwater, temperaturen van —40 °C en hoger tot op 0,1 °C constant gehouden worden.

Soms is het noodzakelijk het te onderzoeken voorwerp door een lucht- of een gasstroom te koelen, omdat het b.v. op meettechnische gronden niet in contact met de warmteoverdragende onderdelen mag staan. Zo zouden er b.v. bij het meten van de temperatuurcoefficiënt van de capaciteit van keramische miniatuurcondensatoren, als deze direct op het warmtecontactmetaal bevestigd zouden worden, fouten ontstaan door parasitaire capaciteiten. Voor dit speciale doel werd de koelwindtunnel van *fig. 21* ontworpen (afmetingen

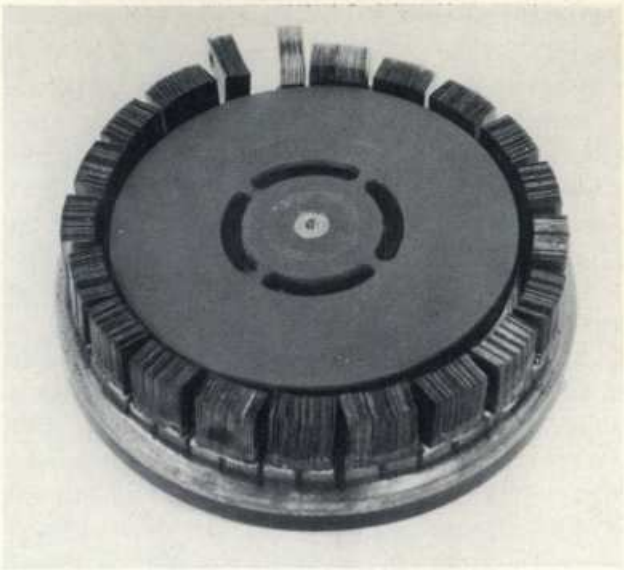


Fig. 20. Ringvormige Peltier-batterij met luchtkoeling door een radiaal blazende ventilator (gemiddelde diameter 80 mm). De metalen verbindingsstukken van de elementen zijn uitgevoerd als blokken met 24 koelribben in de vorm van koperlamellen van $5 \times 11 \times 0{,}2$ mm op onderlinge afstanden van 0,2 mm. De 20 elementen zijn ingegoten in een flens van plexiglas, waarmee de batterij aan het te koelen voorwerp bevestigd kan worden. De ventilatormotor en de leivlakken voor de koellucht zijn verwijderd.

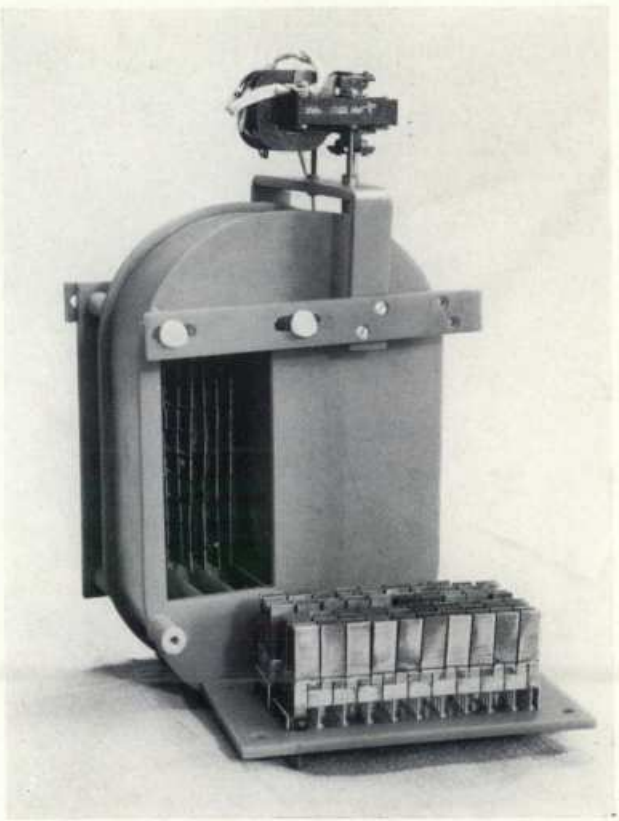


Fig. 21. Koelwindtunnel. De afmetingen zijn $240 \times 150 \times 67$ mm. Circulerende lucht wordt (links) gekoeld door vier Peltier-batterijen (laboratoriumexemplaren) en stroomt (rechts) langs de te koelen voorwerpen. De vier batterijen zijn verdeeld over twee eenheden. Een eenheid is losgemaakt en de warmte-isolatie ervan is verwijderd. Aan de bovenkant is de ventilatormotor voor de luchtcirculatie zichtbaar. De te koelen voorwerpen worden door een niet-zichtbare opening rechts in de apparatuur gebracht.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

240×150×67 mm). Deze is met vier met water gekoelde Peltier-batterijen (laboratoriumexemplaren) van elk veertig elementen uitgerust; hierbij zijn de metalen verbindingsstukken aan de *koude kant* van koelribben voorzien, die voor de warmte-uitwisseling met de luchtstroom zorgen. Met dit apparaat, dat wat het koelvermogen betreft met ongeveer 7 batterijen van het type PT 20/20 overeenkomt, werd bij een omgevingstemperatuur van 20 °C en met koelwater van 12 °C bij het koelobject −35 °C bereikt.

Als voorbeeld van een toepassing waarbij aan de constantheid van de temperatuur hogere eisen gesteld worden, noemen we het in dit laboratorium door H. Polnitzky [4] ontwikkelde koelapparaat dat de referentietemperatuur van thermo-elementen op het ijspunt (0 °C) stabiliseert (*fig. 22*). Met enkele Peltierelementen wordt een ongeveer 1 mm dikke waterlaag afgekoeld tot er ijsvorming optreedt. Deze laag heeft in de vloeibare toestand een veel kleinere weerstand dan in de bevroren toestand. De weerstandsverandering bij 0 °C stuurt de Peltier-stroom zodanig dat een metaalplaatje met een nauwkeurigheid van ±0,01 °C op 0 °C wordt gehouden. In dit plaatje kunnen een aantal thermokoppellassen in gaten aangebracht worden.

Een thermostaat van zeer grote precisie is door F. Becker [5] geconstrueerd en beproefd. Hierin wordt de op constante temperatuur te houden badvloeistof geroerd met een centrifugaalpomp. De af- en toevoer van warmte wordt verzorgd door een Peltier-batterij van het type PT 20/20 waarvan het vermogen continu gestuurd wordt door een optische regelthermometer [6]. Op deze wijze werd in een thermostaat van 10 liter de temperatuur bij 25 °C binnen ±0,001 °C constant gehouden.

Fig. 23 toont een koel- en verwarmingsapparaatje voor microscooppreparaten, waarin de Peltier-koeling bijzonder goed tot zijn recht komt. Hiermee kan de snelheid van afkoelen of verwarmen nauwkeurig geregeld worden, wat b.v. van belang is bij het maken van een kristalfilm, waarbij het aankomt op de juiste afkoelsnelheid. Het apparaat heeft een opening voor licht, zodat alle microscopische onderzoekingsmethodes met door- en opvallend en gepolariseerd licht mogelijk zijn. Convectie en het beslaan van de glaasjes wordt zo nodig met een dekseltje voorkomen. De werktemperatuur die dit apparaat, dat in vermogen met de PT 11/20 overeenkomt, bij de preparaattafel kan bereiken, ligt tussen −40 en +100 °C. Het beste middel om de temperatuur te bepalen is een op een metaalplaatje gelast thermokoppel, dat op de preparaattafel zo dicht mogelijk bij het preparaat geschoven wordt. De ijking voert men uit met stoffen met een bekend smeltpunt. Voor de vele toepassingsmogelijkheden in de microchemie, de farmacologie, de mineralogie en de biochemie, b.v. bij het bepalen van smeltpunten en bij de thermomicroanalyse van organische stoffen, zij naar de vakliteratuur verwezen [7].

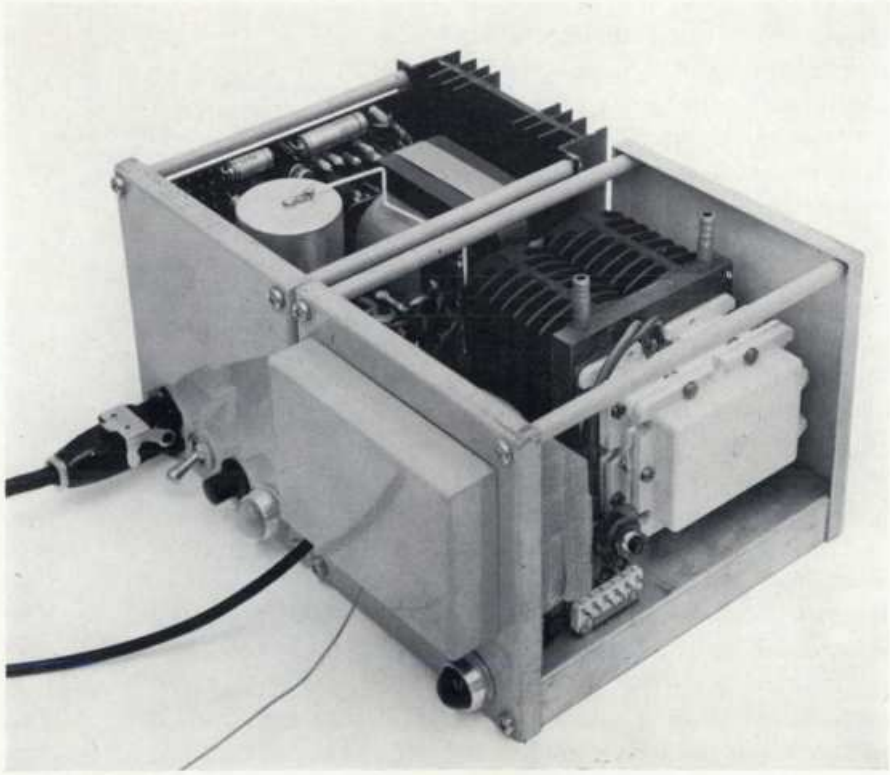


Fig. 22. Voorbeeld van een ijspunt-thermostaat volgens Polnitzky [4]. Het deksel is verwijderd.

Het gebruik van Peltier-elementen bij het afkoelen

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

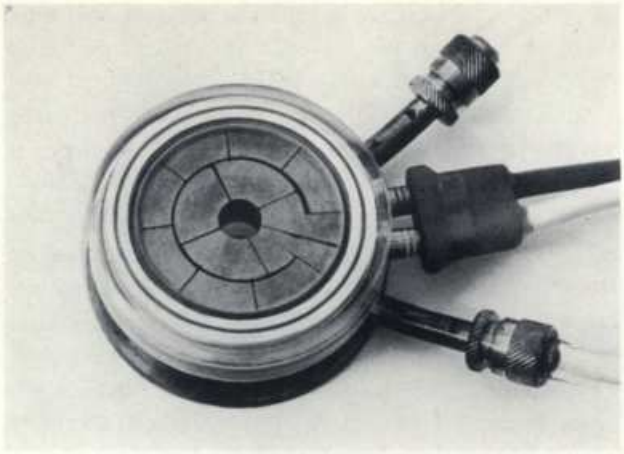


Fig. 23. Koel- en verwarmingsapparaat voor een microscoop. Het bevat 12 elementen en wordt met water gekoeld.

van de spiegel van een dauwpunt-hygrometer kan al bijna klassiek genoemd worden. Als verdere ontwikkeling van een reeds enkele jaren geleden in dit tijdschrift beschreven apparaat [8] heeft E. Andrich [9] in dit laboratorium een van de netspanning onafhankelijke en met transistors gestuurde dauwpunt-hygrometer geconstrueerd. Dit is een eenvoudig apparaat, waarbij het beslaan van de spiegel wordt waargenomen met een cadmiumsulfide-fotoweerstand die reageert op het diffuus worden van de lichtreflexie. Met dit toestel wordt het dauwpunt continu gemeten, in zoverre dat de spiegel ongeveer 100 maal per minuut beslaat en weer helder wordt. Het dauwpunt wordt op 0,1 °C nauwkeurig bepaald; het meetgebied ligt ongeveer tussen −30 en +50 °C. Als mogelijke toepassingen van dit apparaat denkt men ook aan de controle van het vochtgehalte van gassen of vacua, b.v. bij chemotechnische processen.

Voor koelproblemen waarbij het gewenste koelvermogen bij voorgeschreven temperaturen gelijkmatig verdeeld moet worden over een groot volume, biedt weer de Peltier-koeling de eenvoudigste oplossing. Zo wordt b.v. bij de elektroforese gebruik gemaakt van de mogelijkheid om de elementen op een willekeurige manier te rangschikken. Bij elektroforese laat men kleine, in een niet-geleidende vloeistof gesuspendeerde, deeltjes in een elektrisch veld tussen twee elektrodes lopen; deeltjes van verschillende lading en/of grootte worden dan in verschillende mate afgebogen en daardoor gescheiden. De stroom van geladen deeltjes gaat vaak met een aanzienlijke ontwikkeling van Joulewarmte gepaard (soms enkele honderden watts), die via convectie het scheidingsproces zou storen en daarom door koeling moet worden gecompenseerd. W. Grassmann en K. Hannig [10] hebben een zeer effectieve methode voor het preparatieve scheiden van eiwitten ontwikkeld, die thans als „continue" of „afbuigings-elektroforese" bekend staat. Een apparaat dat volgens deze methode werkt, is in *fig. 24* afgebeeld, en wel de (Peltier-gekoelde) achterkant ervan. In een (niet zichtbare) vlakke scheidingsruimte die zich over de voorkant uitstrekt, injecteert men een fijne straal van het te scheiden mengsel in een dispersiemiddel dat continu door de scheidingsruimte stroomt. Een elektrisch veld loodrecht op de stroomrichting, opgewekt met

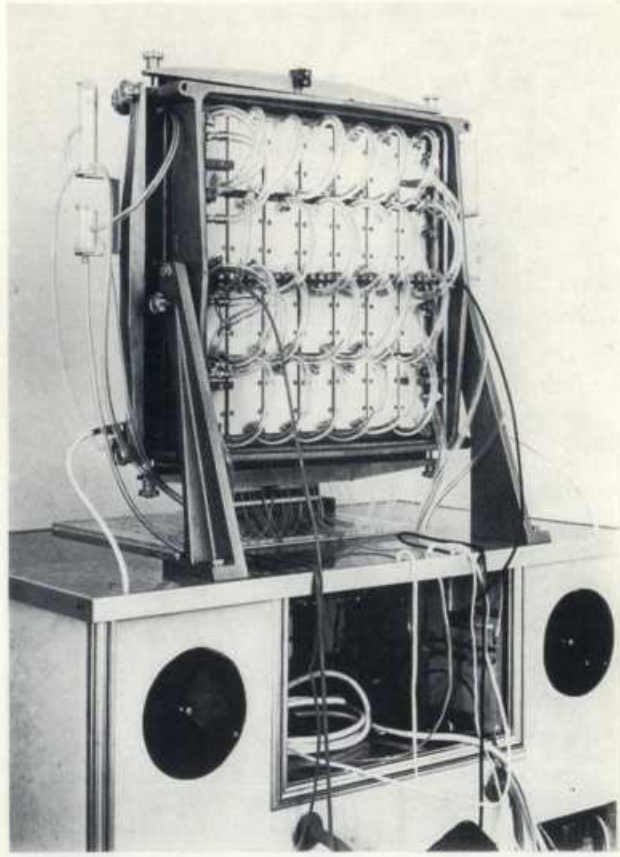


Fig. 24. Elektroforese-apparaat volgens K. Hannig [10] om eiwitten te scheiden. Om de temperatuur te stabiliseren, worden 28 Peltier-batterijen van het type PT 20/20 gebruikt.

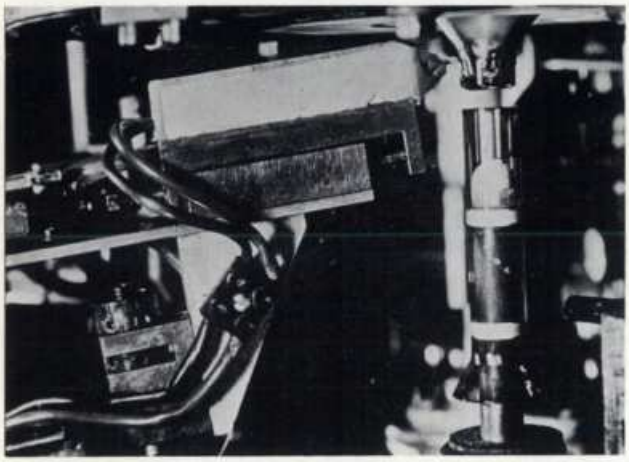
[4] H. Polnitzky, Eispunkt-Thermostat, Z. Instrumentenkunde **73**, 11-13, 1965 (no. 1).
[5] F. Becker en W. Walisch, Präzisionsthermostat mit optischem Regelthermometer und gesteuerter Peltier-Kühlung, Z. phys. Chem. NF **34**, 369-378, 1962.
[6] W. Walisch en F. Becker, Kontinuierliche Temperaturregelung mit Hilfe eines optisch gesteuerten Regelthermometers, Z. phys. Chem. NF **29**, 371-376, 1961.
[7] Zie b.v.: A. Kofler en L. Kofler, Thermo-Mikro-Methoden zur Kennzeichnung organischer Stoffe und Stoffgemische, Verlag Chemie, Weinheim 1954.
[8] P. Gerthsen, J. A. A. Gilsing en M. van Tol, Een automatisch werkend dauwpuntsapparaat met Peltier-koeling, Philips techn. T. **21**, 211-215, 1959.
[9] Niet gepubliceerd.
[10] W. Grassmann en K. Hannig, Präparative Elektrophorese, in: Houben-Weyl, Methoden der organischen Chemie, 4. Auflage, Bd. 1/1, 681-751, 1958.
K. Hannig, Eine Neuentwicklung der trägerfreien Ablenkungselektrophorese und ihre Anwendung auf zytologische Probleme, Habilitationsschrift München, juni 1964.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

behulp van twee elektrodes aan de zijkanten van het apparaat, buigt de elektrisch geladen deeltjes over een zekere hoek van de oorspronkelijke stroomrichting af. De verschillende stoffen worden dan, ruimtelijk gescheiden, in verschillende afvoeropeningen opgevangen. Uit metingen van de temperatuurverdeling in de scheidingskamer (de temperatuur was tot op $\pm 0{,}5$ °C constant) bleek de superioriteit van de Peltier-koeling boven andere eerder geprobeerde methodes, die te grote plaatselijke afwijkingen gaven. Hierdoor en door een nauwkeuriger aanpassing van de temperatuur aan het onderhavige scheidingsprobleem werd een scherpere scheiding bereikt.

Een voorbeeld van toepassing van Peltier-koeling in de industrie is in *fig. 25* weergegeven. Bij de massa-



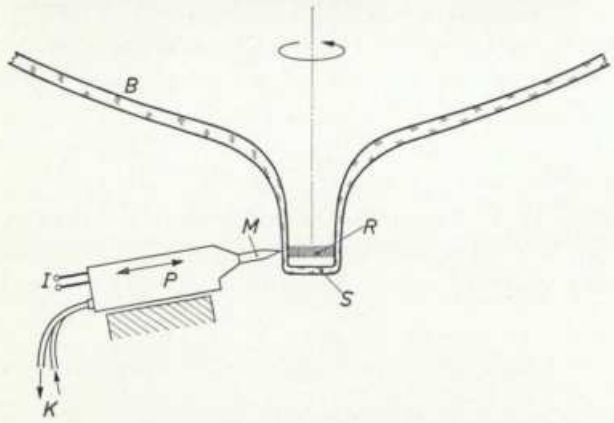


Fig. 25. Het automatisch af laten springen van de glasstomp van de conus bij de fabricage van beeldbuizen. In de schets is *B* de conus, *S* de glasstomp. Het mes *M* wordt tot -6 à -8 °C gekoeld met de Peltier-batterij *P* (type PT 20/20), en in contact gebracht met de ringzone *R* nadat deze is verhit. *I* aansluiting voor de stroom. *K* koelwater.

fabricage van televisiebeeldbuizen laat men de glasstomp van de beeldbuisconus afspringen voor het aanzetten van de hals. Hiertoe wordt een zone aan het ondereind van de roterende beeldbuisconus eerst verhit en dan met een tot -5 °C of lager afgekoeld mes aangeraakt. Daardoor krijgt men een schoon breukvlak, waar de hals (de onderste buis in de foto fig. 25) direct aan vastgezet kan worden.

In het bovenstaande is aan de hand van een aantal voorbeelden een overzicht gegeven van het toepassingsgebied van de Peltier-koeling. Dit is bepaald door een aantal bijzondere eigenschappen van het Peltier-element: het is eenvoudig van bouw, aanpasbaar, betrouwbaar, gemakkelijk te regelen en uit te wisselen en het vereist geen onderhoud. We merken nog op dat duurproeven, gedeeltelijk met verscherpte eisen, reeds aangetoond hebben dat voor Peltier-batterijen een levensduur van jaren zonder prestatievermindering te verwachten is. Overal waar behalve het koelvermogen nog bijzondere eigenschappen als de bovengenoemde vereist worden, en speciaal daar waar de temperatuur zeer nauwkeurig moet worden geregeld, zal de Peltier-koeling ongetwijfeld een belangrijke plaats gaan innemen naast andere koelmethodes.

Literatuur

Van het grote aantal publikaties die reeds over het onderwerp zijn verschenen, noemen we hier nog enkele samenvattende artikelen en boeken. Hierin worden zowel de fysische problemen behandeld die optreden bij de ontwikkeling en de bereiding van de materialen en de daarbij behorende meetmethodes, alsook de toepassingen (het ontwerpen en berekenen van apparaten).

G. Lautz, Über die technische Ausnutzung der Thermokraft von Fastmetallen und Halbleitern, Halbleiterprobleme (Vieweg, Brunswijk) **4**, 145-189, 1958.

P. Gerthsen, Thermoelektrische Anwendung von Halbleitern, Z. angew. Phys. **13**, 435-444, 1961.

A. F. Ioffe, Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling, Infosearch, Londen 1957.

P. H. Egli, Thermoelectricity, Wiley, New York 1960.

R. R. Heikes en R. W. Ure, Jr., Thermoelectricity: science and engineering, Interscience Publ., New York 1961.

Samenvatting. Als er in een stroomkring, bestaande uit twee geleiders van verschillend materiaal in serie, een elektrische stroom loopt, wordt er effectief warmte getransporteerd van het ene contact naar het andere. Op dit „Peltier-effect" berust de werking van een Peltier-element als warmtepomp en als koelapparaat. De theorie van dit effect en van het nauw verwante Seebeck-effect wordt besproken. Hieruit blijkt dat men de grootste effecten kan verwachten in halfgeleiders, met name in een combinatie van een *P*- met een *N*-halfgeleider, en zeer geringe effecten in metalen.

Er is een optimale stroomsterkte waarbij het koelvermogen van een Peltier-element maximaal is. De kwaliteit (maximaal koelvermogen, maximale temperatuurverlaging, rendement) wordt bepaald door een „kwaliteitsgetal", dat vrijwel alleen afhangt van de eigenschappen van de gebruikte materialen (warmte- en elektrisch geleidingsvermogen, Peltier-coëfficiënt). De beste materialen voor Peltier-koeling zijn van bismuttelluride afgeleide verbindingen. Bereiding en eigenschappen hiervan worden besproken. Het nadelige effect van een rimpel op de voedingsstroom wordt geanalyseerd. Dit blijkt in het algemeen niet ernstig te zijn. Aan de hand van een aantal toepassingsvoorbeelden worden ten slotte de speciale voordelen van het Peltier-element als koelapparaat belicht: het is klein, eenvoudig van bouw, aanpasbaar, betrouwbaar, gemakkelijk te regelen (daardoor speciaal geschikt voor temperatuurstabilisatie) en het vereist geen onderhoud.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Stikstof in siliciumijzer

J. D. Fast

546.17:621.318.13

Van de hand van prof. Fast zijn reeds tal van publikaties in ons tijdschrift verschenen. Onderstaand artikel is een hoofdstuk uit zijn onlangs uitgekomen boek „Interaction of metals and gases" [*]. Dit hoofdstuk handelt over methodes om in siliciumijzer een speciale kristaloriëntatie te doen ontstaan die aan dit materiaal gunstige magnetische eigenschappen verleent. Belangrijk nieuw inzicht werd verkregen door proefnemingen van de auteur — nu omstreeks tien jaar geleden — waarbij hij voor bovenstaand doel kleine hoeveelheden van een tweede faze in het metaal liet ontstaan. Zijn experimenten gaven de stoot tot uitgebreide onderzoekingen in diverse landen, waarvan het resultaat onder meer geweest is een betere beheersing van de produktie van het technische siliciumijzer dat gebruikt wordt voor het maken van transformatorkernen.

Stikstof kan een belangrijke rol spelen in siliciumijzer dat als „ijzer"-kern wordt gebruikt in transformatoren, elektromotoren en dynamo's. Het ijzer (of als men wil staal) dat in transformatoren wordt gebruikt, bevat in de regel ongeveer 3% silicium.

In de oudste transformatoren gebruikte men als kern ongelegeerd staal, dat door zachtgloeien zo goed mogelijk van inwendige spanningen was bevrijd. De coërcitiefkracht en de hysteresisverliezen van dit materiaal waren betrekkelijk groot als gevolg van de vele hierin voorkomende insluitsels, speciaal insluitsels van ijzercarbide. Ook de wervelstroomverliezen waren betrekkelijk groot als gevolg van het grote elektrische geleidingsvermogen. Bijzonder onaangenaam was dat de coërcitiefkracht en de hysteresisverliezen in de loop van de tijd spontaan groter werden. Deze zg. magnetische veroudering werd veroorzaakt door langzame precipitatie van stikstof in de vorm van ijzernitride [1].

Het siliciumijzer dat in transformatoren wordt gebruikt, heeft kleinere wervelstroomverliezen dan ongelegeerd staal door zijn grotere elektrische weerstand. Ook zijn hysteresisverliezen zijn kleiner, doordat silicium de vorming van grafiet bevordert, dat magnetisch minder ongunstig is dan ijzercarbide, aangezien het bij een gelijk aantal koolstofatomen een veel kleiner volume aan insluitsels geeft. Belangrijk is voorts dat siliciumijzer geen verouderingsverschijnselen vertoont, omdat de als verontreiniging aanwezige stikstof door een geschikte gloeibehandeling in de vorm van een zeer stabiel siliciumnitride gebracht wordt [2]. De samenstelling van dit nitride is Si_3N_4 [3]. Ook dit precipitaat moet overigens als ongewenst worden beschouwd, aangezien het, evenals alle andere precipitaten, een ongunstige invloed heeft op de coërcitiefkracht en de hysteresisverliezen. In het volgende zullen wij echter zien dat men door opzettelijke toevoeging van stikstof aan siliciumijzer ook profijt kan trekken van de aanwezigheid van dit element om een magnetisch gunstige kristaloriëntatie te verkrijgen.

De rol van Si_3N_4 bij het maken van gericht siliciumijzer

Tot voor betrekkelijk korte tijd werd vrijwel alle siliciumijzerplaat voor transformatoren door warm walsen verkregen. De richtingen van gemakkelijke magnetisatie, ⟨100⟩, van de afzonderlijke kristallen in de plaat zijn dan vrijwel willekeurig over de verschillende richtingen van de ruimte verdeeld (*fig. 1*), waardoor de hysteresisverliezen betrekkelijk groot zijn. Voor het vervaardigen van transformatorkernen zou men

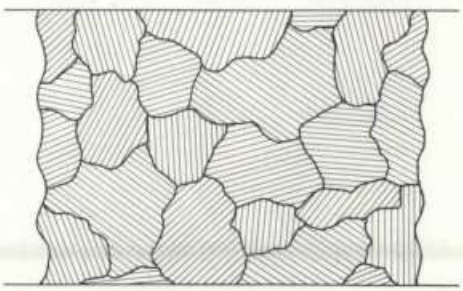


Fig. 1. Schematische voorstelling van de kristallen in warm gewalste 3%-siliciumijzerplaat. Er is geen voorkeursoriëntatie ten opzichte van walsvlak en walsrichting.

Prof. dr. J. D. Fast is medewerker van Philips' Natuurkundig Laboratorium te Eindhoven en tevens buitengewoon hoogleraar in de Fysische Chemie aan de Technische Hogeschool Eindhoven. Op 9 januari 1965 is aan prof. Fast door de Technische Hogeschool Delft het doctoraat honoris causa verleend „wegens zijn uitstekende verdiensten op het gebied van het wetenschappelijk en technisch metaalonderzoek".

[*] J. D. Fast, Interaction of metals and gases, I. Thermodynamics and phase relations, uitg. Centrex, Eindhoven 1965.

[1] J. D. Fast, Philips techn. T. **13**, 165, 1951; J. D. Fast en L. J. Dijkstra, Philips techn. T. **13**, 172, 1951.

[2] J. D. Fast, Philips techn. T. **17**, 1, 1955.

[3] W. C. Leslie, K. G. Carroll en R. M. Fisher, Trans. AIME **194**, 204, 1952; H. A. Sloman, J. Iron Steel Inst. **182**, 307, 1956.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

het liefst willen uitgaan van grote plaatvormige monokristallen (begrensd door kubusvlakken) en daaruit de kernen op een zodanige wijze maken dat de magnetische flux steeds een richting van gemakkelijke magnetisatie volgt (*fig. 2*).

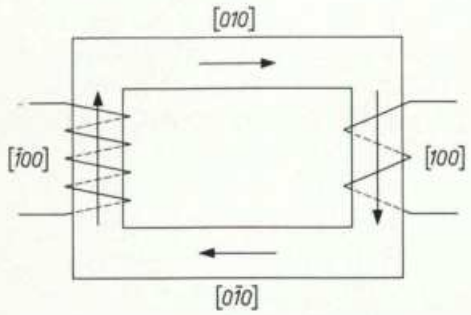


Fig. 2. Symbolische voorstelling van een transformator waarvan de kern zodanig uit monokristallijne platen is opgebouwd dat de magnetische flux overal een voorkeursrichting, d.i. een ⟨100⟩-richting, kan volgen.

Technisch is het niet mogelijk plaat van monokristallijn siliciumijzer in grote hoeveelheden te maken. Wel is het mogelijk gebleken op grote schaal (in hoeveelheden van duizenden tonnen per maand) polykristallijne plaat te vervaardigen waarin alle kristallen bijna dezelfde oriëntatie hebben (*fig. 3*). Deze oriëntatie is daardoor gekenmerkt dat de kristallen met een (110)-vlak ongeveer evenwijdig aan het plaatoppervlak liggen en met een [001]-richting, d.w.z. een magnetische voorkeursrichting, ongeveer evenwijdig aan de walsrichting (*fig. 4*). Men duidt deze textuur, ter ere van de uitvinder Goss, vaak aan als Goss-textuur, of ook wel als (110)[001]-textuur [4]. Zij is schematisch uitgebeeld in *fig. 5* met behulp van een aantal kubussen die de elementaire cellen symboliseren. De Goss-textuur wordt verkregen door het siliciumijzer vanaf een bepaalde dikte koud te walsen en door het aan bepaalde warmtebehandlingen te onderwerpen.

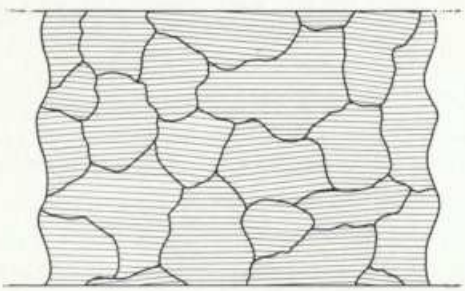


Fig. 3. Schematische voorstelling van de kristallen in koud gewalste 3%-siliciumijzerplaat waarin alle kristallen ongeveer dezelfde oriëntatie hebben, nl. de oriëntatie (110)[001] (vgl. fig. 4).

Gedurende vele jaren kon men niet verklaren op welke wijze de kristaloriëntatie in de Goss-plaat tot stand komt. Als gevolg daarvan gaf de produktie niet altijd de gewenste resultaten. Onze eigen experimenten leerden dat het onmogelijk is om de Goss-textuur te krijgen in siliciumijzerplaat dat uit zeer zuiver ijzer en silicium bereid is. Daaruit konden wij concluderen dat de aanwezigheid van verontreinigingen in het materiaal van essentieel belang is [5]. Verder experimenterend voegden we bekende hoeveelheden van bepaalde stoffen aan zuiver siliciumijzer toe. Gevonden werd dat de gewenste textuur zonder moeite kan worden verkregen door enkele honderste procenten stikstof aan de legering toe te voegen en door vóór het koud walsen een zodanige warmtebehandeling toe te passen dat zich in het metaal een fijnverdeeld precipitaat van Si_3N_4 vormt. Dit precipitaat vormt zich in hoofdzaak aan de korrelgrenzen [6]. *Fig. 6* toont een elektronenmicroscopische foto van 3%-siliciumijzer waarin een Si_3N_4-precipitaat aanwezig is.

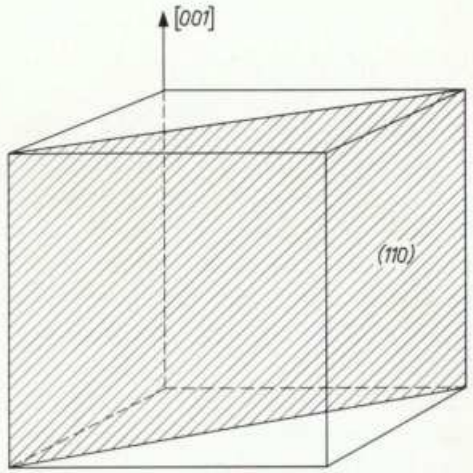


Fig. 4. In siliciumijzerplaat met (110)[001]- ofwel Goss-textuur zijn de kristallen zo georiënteerd dat zij met een (110)-vlak ongeveer evenwijdig aan het plaatoppervlak liggen en met een [001]-richting evenwijdig aan de walsrichting (vgl. fig. 5).

Na het koud walsen en na primaire rekristallisatie bevat zowel de zuivere siliciumijzerplaat als de plaat met Si_3N_4 nog slechts zeer weinig kristallen met de oriëntatie (110)[001]. In de zuivere legering wordt de primaire rekristallisatie (bij voldoend hoge temperatuur, b.v. 900 °C) gevolgd door een normale korrelgroei die geen voorkeur voor een bepaalde oriëntatie vertoont. In het stikstofhoudende siliciumijzer wordt de normale korrel-

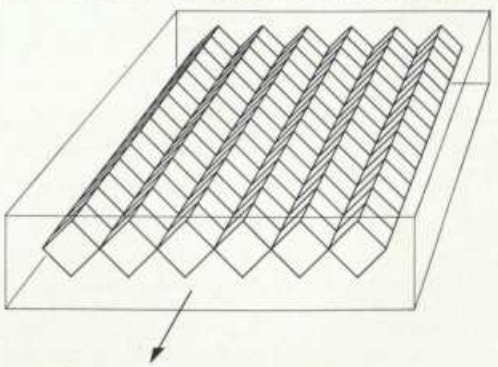


Fig. 5. Uitbeelding met behulp van kubussen van de oriëntatie der kristallen in magnetisch staal met Goss-textuur (cube-on-edge texture). De pijl duidt de walsrichting aan.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

groei belemmerd door het Si_3N_4-precipitaat. Verhitting van dit siliciumijzer in het juiste temperatuurgebied (in zuivere waterstof om oxidatie te voorkomen) veroorzaakt een langzame coagulatie van de groeibelemmerende insluitsels en een geleidelijk oplossen ervan. Er komt dan een moment waarop de kristallen met (110)[001]-oriëntatie reeds gaan groeien, de andere echter nog niet. Dit is een voorbeeld van wat men secundaire rekristallisatie (exaggerated grain growth) noemt, die in het algemeen daardoor gekenmerkt is dat enkele gunstig georiënteerde kristallen groeien ten koste van de minder bevoorrechte. In het beschouwde geval leidt dit tot de vorming van kristallen die vele malen groter zijn dan de plaat dik is. De drijvende kracht voor de selectieve groei van deze kristallen is de kleine oppervlakenergie van de (110)-vlakken in de hierbij toegepaste atmosfeer van zuivere waterstof [7]. Deze is kleiner dan die van alle andere (*hkl*)-vlakken.

Fig. 6. Elektronenmicroscopische foto van 3%-siliciumijzer waarin een precipitaat van Si_3N_4 aan de kristalgrenzen aanwezig is. De afgebeelde oppervlakte is 17 bij 19 micron.

De besproken selectieve korrelgroei treedt in een bepaald temperatuurgebied op. Verhit men het stikstofhoudende siliciumijzer voor of na de primaire rekristallisatie op een te hoge temperatuur (b.v. 1250 °C), dan gaan de insluitsels zeer snel in oplossing, waardoor men in hoofdzaak normale korrelgroei en derhalve een slechte textuur krijgt. Men moet daarom eerst op een lagere temperatuur (900-1000 °C) verhitten. Zodra de (110)[001]-kristallen een voldoende voorsprong in grootte op de andere kristallen hebben behaald, kan de temperatuur worden verhoogd om de verdere groei te versnellen.

De Si_3N_4-deeltjes, die zo gunstig zijn voor het ontstaan van de Goss-textuur, hebben een ongunstige invloed op de uiteindelijke magnetische eigenschappen van het materiaal. Zij moeten dus uit het siliciumijzer worden verwijderd nadat zij hun groeiregelende taak hebben verricht. In een atmosfeer van zuivere waterstof geschiedt dit automatisch tijdens de eindgloeiing, doordat onder deze omstandigheden alle stikstof het metaal verlaat [5,8].

In de technische 3%-siliciumijzerlegeringen is MnS de belangrijkste verontreiniging die de normale korrelgroei na de primaire rekristallisatie belemmert [9]. Ook verscheidene andere insluitsels [10] kunnen deze taak verrichten. Van primair belang is hierbij weer dat zij in de gewenste afmetingen en verdeling in het metaal aanwezig zijn. Voor insluitsels van MnS blijkt dit op overtuigende wijze uit een onderzoek van Fiedler [11]. Hij experimenteerde met een 3,3%-siliciumijzerlegering welke iets minder dan 0,1% MnS bevatte. Deze laatste verbinding kon geheel in oplossing worden gebracht door het metaal op 1325 °C te verhitten. De meest effectieve graad van dispersie kon daarna op twee wijzen worden verkregen: *a*) door een juiste keuze van de afkoelingssnelheid, *b*) door snel afschrikken, gevolgd door een precipitatieverhitting op lagere temperatuur (1000 °C).

Een voordeel van Si_3N_4 boven andere vertragers van de korrelgroei is de omstandigheid dat na de eindgloeiing geen enkele verontreiniging in het metaal achter-

[4] N. P. Goss, Trans. Amer. Soc. Met. **23**, 511, 1935; R. M. Bozorth, Trans. Amer. Soc. Met. **23**, 1107, 1935; C. G. Dunn, Cold working of metals, Amer. Soc. for Metals, Cleveland 1949, blz. 113-130.
[5] J. D. Fast, Philips Res. Repts. **11**, 490, 1956.
[6] Zie ook: J. D. Fast en J. J. de Jong, J. Phys. Radium **20**, 371, 1959.
[7] J. E. May en D. Turnbull, Trans. AIME **212**, 769, 1958; J. L. Walter en C. G. Dunn, Trans. AIME **215**, 465, 1959 en **218**, 1033, 1960.
[8] J. D. Fast en H. A. C. M. Bruning, Z. Elektrochemie **63**, 765, 1959.
[9] Zie het eerste aangehaalde artikel in noot [7].
[10] H. C. Fiedler, Trans. AIME **221**, 1201, 1961; M. J. Markuszewicz, J. Iron Steel Inst. **200**, 223, 1962.
[11] H. C. Fiedler, Trans. AIME **230**, 95, 1964 (no. 1).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

blijft. De magnetische eigenschappen van het metaal zijn dientengevolge uitzonderlijk goed.

De eigenschappen van siliciumijzerplaat met Goss-textuur wijken in bepaalde opzichten niet veel af van die van monokristallijn siliciumijzer. Een nadeel is echter dat in het walsvlak in de richting loodrecht op de walsrichting, de magnetisch ongunstige [110]-richtingen der kristallen liggen (vgl. fig. 5). Men kan dus slechts volledig profijt van dit materiaal trekken als de magnetische flux overal evenwijdig is aan de walsrichting, d.w.z. indien men het gebruikt in de vorm van ringkernen, gewikkeld uit plaat en niet b.v. in de vorm van E-platen.

Voor vele toepassingen zou het wenselijk zijn over siliciumijzerplaat met zg. kubustextuur ofwel (100)[001]-textuur [12] te kunnen beschikken, d.w.z. over plaat waarin de kristallen zo zijn georiënteerd dat niet alleen de walsrichting, maar ook de richting loodrecht daarop in het walsvlak, een magnetische voorkeursrichting is (zie *fig. 7*). In Duitsland en in de V.S. is men er

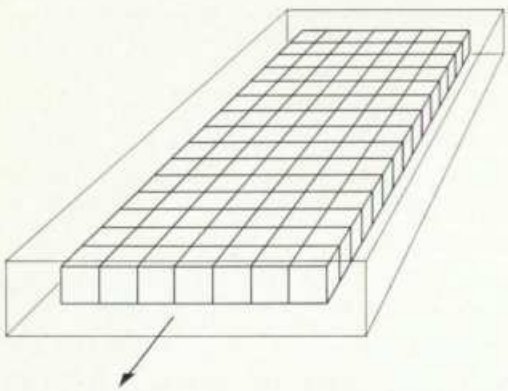


Fig. 7. Uitbeelding van de kubustextuur met behulp van een aantal kubussen. De pijl duidt de walsrichting aan.

reeds in geslaagd dit materiaal met (100)[001]-textuur op kleine schaal te maken. Bij deze vervaardiging speelt de interactie tussen het metaaloppervlak en de omringende gasatmosfeer een zeer belangrijke rol. Overschrijdt de zuurstofactiviteit van het gas een bepaalde waarde, dan hebben niet langer de (110)-vlakken maar de (100)-vlakken een kleinere oppervlakenergie dan alle andere (*hkl*)-vlakken, met andere woorden de drijvende kracht voor de groei van de (100)-kristallen is dan groter dan die van de (110)-kristallen.

Op overtuigende wijze wordt het voorgaande gedemonstreerd door experimenten van Walter en Dunn [13] over de verplaatsing van (100)/(110)-grenzen, d.w.z. grenzen tussen kristallen waarvan het ene met een (100)- en het andere met een (110)-vlak evenwijdig aan het oppervlak van de 3 %-siliciumijzerplaat ligt. Bij 1200 °C verplaatsen deze grenzen zich in een goed vacuüm zodanig dat de (110)-kristallen ten koste van de (100)-kristallen groeien. Brengt men het metaal in contact met onzuiver argon, dan verplaatsen de grenzen zich in tegengestelde richting. Men kan dit spel zo vaak herhalen als men maar wil door afwisselend in vacuo of in onzuiver argon te verhitten. De genoemde onderzoekers verklaren deze resultaten door aan te nemen dat het metaal oppervlakkig geoxideerd wordt tijdens de verhitting in onzuiver argon en dat daardoor de oppervlakenergie van de (100)-kristallen zodanig daalt dat zij kleiner wordt dan die van de (110)-kristallen. In een goed vacuüm of in zuivere waterstof daalt de zuurstofconcentratie op het oppervlak volgens deze verklaring tot een zo lage waarde dat de (110)-kristallen de kleinste oppervlakenergie krijgen.

Het maken van 3 %-siliciumijzer met kubustextuur is overigens veel moeilijker en gecompliceerder dan men uit het bovenstaande zou afleiden. Beheersing van de gasatmosfeer tijdens de eindgloeiing is een noodzakelijke, maar geen voldoende voorwaarde voor succes. Tot nu toe is men er niet in geslaagd siliciumijzerplaat met kubustextuur op economische wijze in het groot te fabriceren. De grote moeilijkheid schijnt te zijn de legering in een zodanige toestand te brengen dat na de primaire rekristallisatie een voldoend aantal kristallen met de gewenste oriëntatie (100)[001] aanwezig is. Volgens octrooien van de General Electric Company (V.S.) kan men dit doel op kleine schaal bereiken door uit te gaan van gietblokken die op zodanige wijze gericht zijn gestold dat zij geheel uit gunstig georiënteerde stengelkristallen bestaan.

---

[12] F. Assmus, R. Boll, D. Ganz en F. Pfeifer, Z. Metallk. **48**, 341, 1957; F. Assmus, K. Detert en G. Ibe, Z. Metallk. **48**, 344, 1957; J. L. Walter, W. R. Hibbard, H. C. Fiedler, H. E. Grenoble, R. H. Pry en P. G. Frischmann, J. appl. Phys. **29**, 363, 1958; G. Wiener, P. A. Albert, R. H. Trapp en M. F. Littmann, J. appl.Phys. **29**, 366, 1958.

[13] J. L. Walter en C. G. Dunn, Acta metallurgica **8**, 497, 1960.

Samenvatting. Het artikel is een hoofdstuk uit het onlangs verschenen boek van de schrijver „Interaction of metals and gases". Dit hoofdstuk handelt over de invloed van stikstof op de kristaloriëntatie en de daarmee verband houdende magnetische eigenschappen van gewalst en gerekristalliseerd siliciumijzer, dat algemeen wordt gebruikt voor transformatorkernen. Onder de juiste voorwaarden vormt zich Si_3N_4 als een fijn verdeelde tweede faze die bevorderend werkt op het ontstaan van kristallen met een (110)[001]-oriëntatie (Goss-textuur). Het in technische siliciumijzersoorten aanwezige MnS vervult een soortgelijke functie als Si_3N_4. Ook wordt aandacht gegeven aan experimenten gericht op het verkrijgen van siliciumijzer met een (100)[001]-oriëntatie (kubustextuur), dat voor hetzelfde doel nog beter geschikt zou zijn.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Slagmontage van onderdelen op panelen met gedrukte bedrading

H. Groenhuis en W. L. L. Lenders

621.397.62.049.75.002.72

Voor de gemechaniseerde montage van onderdelen op panelen met gedrukte bedrading streeft men er naar machines te ontwerpen die bij een zo laag mogelijke investering een zo groot mogelijk aantal onderdelen in korte tijd kunnen plaatsen. Sinds enige tijd is hiervoor bij Philips in Eindhoven een nieuwe machine in gebruik die tien onderdelen tegelijk in een paneel kan plaatsen. Zij bevat een interessante constructie, nl. een zwaaiarm die een soortgelijke beweging uitvoert als de menselijke onderarm.

De gemechaniseerde montage van onderdelen op panelen met gedrukte bedrading (prints) heeft de laatste jaren een interessante ontwikkeling doorgemaakt. Na de knipbuigmachine en de montagelijn, die reeds eerder in dit tijdschrift zijn beschreven [1], heeft men een nieuwe techniek ontwikkeld, de *slagmontage*, die met behulp van zg. klapklauwmachines wordt uitgevoerd. Alvorens hierop in te gaan, willen we in het kort de andere in gebruik zijnde methodes memoreren.

H. Groenhuis en W. L. L. Lenders zijn medewerkers van de afdeling Bedrijfsmechanisatie van Philips' Hoofdindustriegroep Radio-, Grammofoon- en Televisie-apparaten, Eindhoven.

Knip-buigmachine en montagelijn

De knip-buigmachine is zeer eenvoudig van constructie en is universeel, maar vereist veel handarbeid. De aansluitdraden van de onderdelen moeten vooraf worden omgebogen, zodat ze in de gaatjes in het paneel kunnen worden gestoken. Het positioneren van het paneel op de machine en het inzetten van elk onderdeel af-

[1] R. van Beek en W. W. Boelens, Gedrukte bedrading in radiotoestellen, Philips techn. T. **20**, 71-79, 1958.
R. van Beek en A. J. Halbmeyer, Volledig gemechaniseerde montage van onderdelen op panelen met gedrukte bedrading, Philips techn. T. **24**, 45-63, 1962.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zonderlijk geschiedt met de hand, waarna de machine de draadeinden die door het paneel steken, afknipt en ombuigt tegen de onderzijde van het paneel.

Bij de montagelijn zijn al deze bewerkingen volledig gemechaniseerd. De machine bestaat uit een rij monteerkoppen die elk telkens één onderdeel in een onder de kop liggend paneel kunnen bevestigen. Door een intermitterend lopende band worden 100 panelen onder de koppen door gevoerd. Bevat de montagelijn 20 koppen, dan worden dus in één rondgang van de band in elk paneel 20 onderdelen gemonteerd. Wil men b.v. 90 onderdelen op de panelen monteren, dan moeten ze dus vijf maal onder de koppen door gaan. Na elke rondgang moeten de monteerkoppen met 100 andere onderdelen worden gevoed en moeten hun posities ten opzichte van het paneel worden veranderd. De koppen zijn daartoe zeer snel verstelbaar, zodat ook kleine series panelen op efficiënte wijze van onderdelen kunnen worden voorzien. Er zijn monteerkoppen voor diverse soorten onderdelen (weerstanden, buishouders enz.).

De slagmontage

De machine voor slagmontage is veel eenvoudiger dan de montagelijn. Het toestel heeft slechts één positie voor het paneel, en dit wordt met de hand hierin geplaatst. Het nieuwe van de methode is dat verschillende onderdelen *gelijktijdig* in het paneel kunnen worden gezet, en wel maximaal 10. Dit heeft men gerealiseerd door de monteerkoppen niet boven het paneel te plaatsen zoals bij de montagelijn, maar er omheen, en door de beweging niet rechtlijnig te doen plaatsvinden, maar langs een halve cirkelboog. Elke kop is daartoe bevestigd aan een arm die een zwaaiende beweging maakt. In de ene uiterste stand van de arm wordt het onderdeel door de kop opgepakt, en in de andere uiterste stand wordt het in het paneel gestoken. In beide standen is het onderdeel met de aansluitdraden naar beneden gericht. Dit wordt mogelijk gemaakt door nog een tweede beweging van de arm, nl. een rotatie van 180° om zijn eigen as. Deze rotatie voert de arm uit tijdens de zwaaibeweging. De totale beweging van de arm laat zich het best vergelijken met de beweging die de onderarm van de mens kan maken. Het mechanisme van de arm met kop wordt „klapklauw" genoemd.

Omdat de tijd die nodig is voor het plaatsen van een onderdeel niet veel langer is dan bij de montagelijn, betekent het tegelijkertijd plaatsen van verschillende onderdelen een grote tijdwinst. Wanneer b.v. 90 onderdelen geplaatst moeten worden, kan dit met 9 klapklauwtafels worden gedaan. Afhankelijk van het te produceren aantal panelen zou men aan deze 9 tafels naar keuze 1-9 operateurs kunnen laten werken. Voor kleine series kan men echter ook met een kleiner aantal tafels volstaan, want de klapklauwen kunnen op de tafel worden verplaatst. Het is dan voordelig om één tafel meer te hebben dan het aantal bezette tafels, zodat, terwijl één tafel door een monteur wordt veranderd, de produktie aan de andere tafels ongehinderd door kan gaan. De klapklauwen worden niet gevoed met losse onderdelen, maar met banden van 1000 stuks (zie titelfoto) rechtstreeks vanuit de verpakking die de onderdelenfabrikant levert. Enige mogelijke opstellingen van de klapklauwen worden getoond in *fig. 1*.

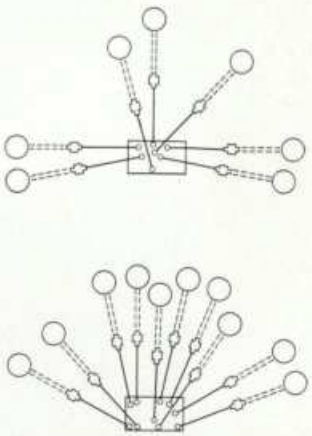


Fig. 1. Twee voorbeelden van mogelijke opstellingen van klapklauwen op een tafel. De rechthoek stelt het paneel voor. Maximaal kunnen 10 klapklauwen tegelijk worden gebruikt.

De constructie van de klapklauw

De vereenvoudigde schets in *fig. 2* geeft een globale indruk van de werking van het klapklauwmechanisme (een detailfoto van de klapklauw wordt verderop in het artikel gegeven). De arm *3*, waaraan de kop *7* is bevestigd, maakt een zwaaiende beweging van stand *I* naar stand *II*, en terug. De aanvoer van de band *10* met onderdelen geschiedt door het mechanisme *C*

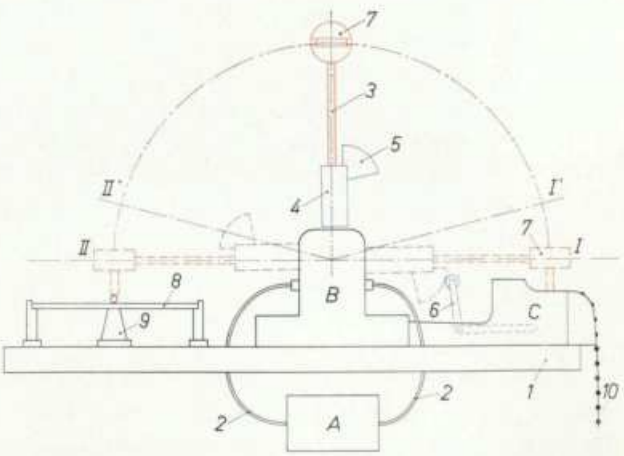


Fig. 2. Schets van het klapklauwmechanisme. Onder het tafelblad *1* bevindt zich het aandrijfmechanisme *A*, dat via Bowdenkabels *2* de arm *3* met de monteerkop *7* (rood) in zwaaiende beweging brengt. Het mechanisme *B* zorgt ervoor dat de arm tijdens de zwaai van 180° van „grijpstand" *I* naar „montagestand" *II* ook 180° om zijn eigen as draait. De nok *5* die aan de houder *4* van de arm is bevestigd, brengt via hefboom *6* (blauw) een mechanisme *C* in beweging, dat voor de aanvoer van de band *10* met onderdelen zorgt. Bij het neerkomen in positie *I* knipt de kop de aansluitdraden van het onderdeel af, buigt ze om en grijpt het onderdeel vast. In positie *II* worden de aansluitdraden door gaten in het paneel *8* geslagen waarbij ze tegen de aambeelden *9* ombuigen, zodat het onderdeel vast aan het paneel wordt bevestigd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

doordat een hefboom *6* wordt gecommandeerd door een nok *5* die aan de houder *4* van de arm is bevestigd. Het onderdeel wordt door dit mechanisme in samenwerking met de kop van de band afgeknipt, waarbij de kop de aansluitdraden ombuigt en tegelijk het onderdeel vastgrijpt. Na een zwaai van 180° wordt in stand *II* het onderdeel gemonteerd. De aansluitdraden worden door gaatjes in het paneel *8* geslagen en tegelijk aan de onderzijde tegen holle aambeeldjes *9* in de gewenste richting omgebogen. Het onderdeel is dan vast aan het paneel verbonden. Tijdens de zwaai voert de arm de genoemde rotatie van 180° om zijn eigen as uit, zodat het onderdeel in de juiste stand boven het paneel komt.

In *fig. 3* is een iets geschematiseerde langsdoorsnede gegeven van het mechanisme voor het aanvoeren (blauw getekend), en het afknippen (groen getekend) van de onderdelen. (De onderdelen zelf zijn geschaduwd.) Het aanvoeren geschiedt door de hark *12* waaraan twee tanden zitten die de aansluitdraden van de onderdelen in de band grijpen. We gaan uit van de toestand waarin de arm in positie *I* ligt (zie fig. 2) en een onderdeel in de kop geklemd zit. De veer *17* wil hefboom *16* naar links trekken, maar in positie *I* wordt dit verhinderd doordat de hefboom *6* wordt tegengehouden door nok *5*. Wanneer de arm zich omhoogbeweegt kan hefboom *6* naar links draaien, zodat nu ook hefboom 16 draait en plaat *22* met de daaraan verbonden hark naar links beweegt. Terwijl de arm naar het paneel zwaait om het onderdeel te monteren, verplaatst de hark de band met onderdelen over een zodanige afstand, dat het volgende onderdeel op de juiste plaats komt. (Deze situatie is in fig. 3 gegeven.) Als aan het eind van een cyclus de arm weer naar stand *I* terugkeert, wordt door de nok en het stangenstelsel de hark weer naar rechts geschoven, zodat hij klaar is voor de volgende cyclus. De band met onderdelen blijft hierbij liggen in de tanden *11*. Wanneer de arm aan het eind van de zwaai naar rechts is gekomen slaat de kop op de messen *18* en drukt deze tegen de werking van de veren *23* in omlaag.

Het mechanisme voor het afknippen van het onderdeel en het grijpen door de kop is geschetst in *fig. 4*. Door de slag van de kop schuiven de messen *18* (groen) langs de platen *19*, zodat de draden worden afgeknipt. Vlak daarna buigen de uitsteeksels *20* van de kop de draden om de platen *21* heen en grijpt de kop het on-

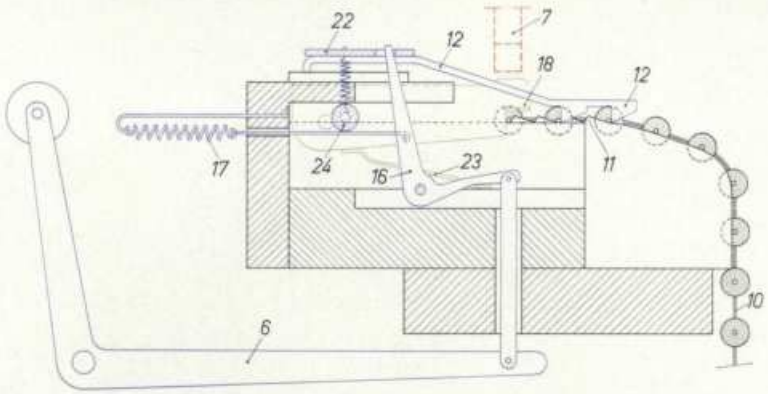


Fig. 3. Mechanisme voor het aanvoeren en afknippen van de onderdelen. (In deze schets zijn alleen de belangrijkste onderdelen getekend, de bewegende onderdelen die voor het aanvoeren zorgen, zijn blauw getekend, die voor het afknippen groen.)
11 tanden waarop de band met onderdelen ligt. *12* hark die bij elke slag van de arm de band zover naar links trekt dat een nieuw onderdeel onder de messen *18* komt. De hark is bevestigd aan het plaatje *22* dat door de hefboom *16* en de veer *17* naar links wordt getrokken. Dit gebeurt zodra hefboom *6* (zie fig. 2) linksom kan draaien doordat arm *3* met nok *5* omhoog gaat. Het plaatje *22* wordt vastgehouden door een veer en een rol *24* die alleen beweging in horizontale richting toelaten. Het afknippen gebeurt door de messen *18* die door de kop *7* naar beneden worden gedrukt tegen de veerkracht van veer *23* in.

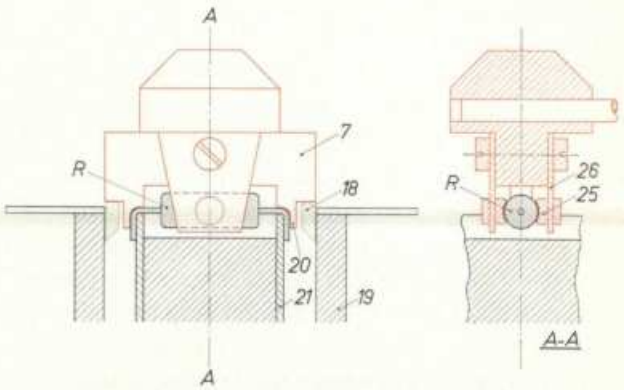


Fig. 4. Mechanisme voor het knippen en buigen van de aansluitdraden en het grijpen van het onderdeel. De kop *7* (rood) drukt de messen *18* (groen) langs de binnenkant van de platen *19*, zodat de draden worden afgeknipt. Daarna buigen de uitsteeksels *20* de draden om de platen *21*. Het lichaam van het onderdeel *R* wordt gegrepen door twee nylonblokjes *25* die om het lichaam klemmen door de werking van twee veertjes *26*.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

derdeel bij het lichaam met behulp van twee nylon blokjes, die in veren zijn bevestigd. In *fig. 5* wordt het mechanisme getoond kort nadat de kop een onderdeel heeft gegrepen. De geleiding van de band met onderdelen is hierop goed zichtbaar.

aan de arm is bevestigd, en het tandwiel *30* (groen) dat kan draaien om een borst van de houder. Dit laatste tandwiel is verend met het huis verbonden door een pen *32* die in een sleuf *33* in het huis past en door veren *31* naar het midden van de sleuf wordt gedrukt

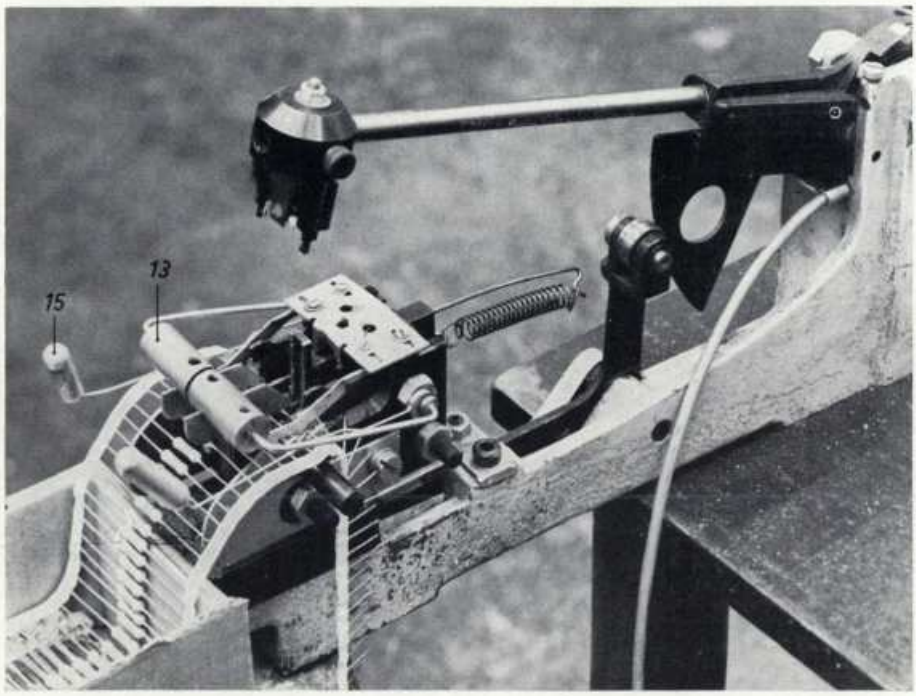


Fig. 5. Het aanvoer- en knip-buigmechanisme. De messen en de hark zijn hier duidelijk zichtbaar. De veren met gewichtjes *15* verhinderen het eventuele opwippen van de aansluitdraden van de onderdelen, en de gewichtjes *13* met de verticale plaatjes houden de onderdelen op de juiste plaats.

Het bewegingsmechanisme van de arm

De bewegingen die de arm moet uitvoeren, bespreken we aan de hand van fig. 2. Tijdens de zwaai van *I* naar *I'* blijft de kop in de positie voor het grijpen van een onderdeel. Tussen *I'* en *II'* voert de arm een rotatie van 180° uit, zodat in *II'* de kop de juiste stand voor de montage heeft ingenomen. Deze stand blijft gehandhaafd tot stand *II* en bij het terugzwaaien tot stand *II'*. Hierna draait de arm weer terug zodat de kop in stand *I'* weer in grijppositie is, enz.

In *fig. 6* is het mechanisme weergegeven waarmee deze bewegingen tot stand worden gebracht. De houder *4* (blauw getekend) waarin de arm (rood) is geplaatst, kan draaien om twee in het huis *34* bevestigde horizontale pennen *35* met tapse einden. Deze draaiing geeft de zwaaibeweging van de arm; de aandrijving heen en terug geschiedt door twee Bowden-kabels *2a* en *2b* die in groeven in het onderste deel van de houder liggen. De arm kan in de houder om zijn eigen as roteren, deze rotatie vindt plaats door middel van twee conische tandwielen, nl. het tandwiel *27* (rood) dat vast

(doorsnede *A-A*). Tijdens het gedeelte *I'-II'* van de zwaaibeweging wordt tandwiel *30* door de pen en de veren gefixeerd ten opzichte van het huis en rolt tandwiel *27* af over *30*, zodat de as roteert. Als de arm de vereiste rotatie heeft uitgevoerd, stuit het uitsteeksel *29* tegen een van de aanslagen *28* (doorsnede *C-C*), waarna de arm en dus ook tandwiel *27* niet meer kan roteren. De zwaaibeweging van de arm gaat echter nog verder en nu moet dus tandwiel *30* meedraaien, waarbij de pen *32* in de sleuf tegen de veerkracht in opzij wordt geduwd. Als de arm, na in de uiterste stand te zijn geweest, weer terugzwaait, wordt eerst de pen teruggeduwd, zodat *30* weer in de oorspronkelijke stand wordt gebracht, waarna het tandwiel *27* weer gaat afrollen over 30 en de arm terugdraait.

De aandrijving van de gehele vrij ingewikkelde beweging van de arm vereist op deze wijze dus slechts twee kabels, die voor elke slag over een bepaalde afstand heen- en weergetrokken moeten worden. De snelheid waarmee dit moet gebeuren, is voor de twee richtingen niet dezelfde. De arbeid die nodig is voor

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

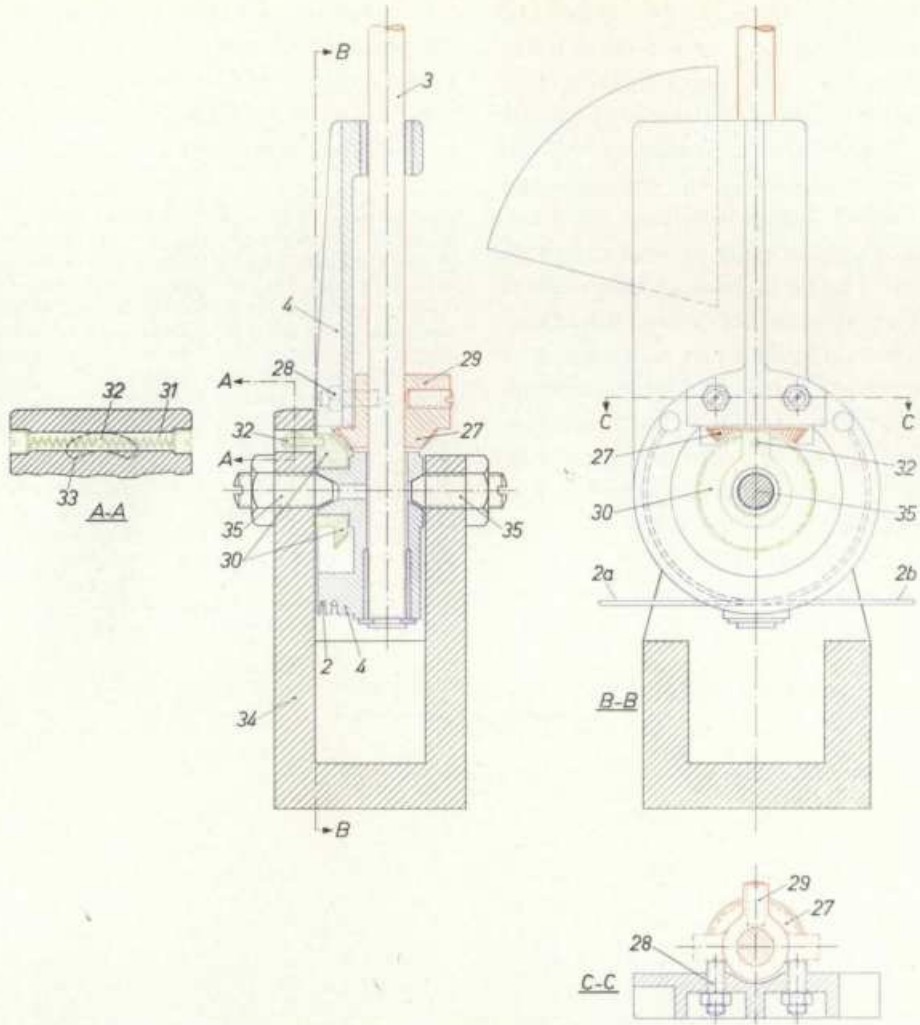


Fig. 6. Enkele doorsneden van het mechanisme voor het bewegen van de arm. Het huis *34* wordt op de tafel bevestigd. De houder *4* (blauw) waarin de arm *3* (rood) is geplaatst, kan draaien om twee pennen *35* (dit geeft de zwaaibeweging van de arm). De arm kan in de houder roteren. De tandwielen *27* (rood) en *30* (groen) veroorzaken deze rotatie tijdens de zwaaibeweging van de arm.

het grijpen van een onderdeel (met het afknippen en ombuigen van de draden) is nl. groter dan de arbeid die nodig is voor het monteren. Het mechanisme dat de beweging van de kabels verzorgt, zal hier niet worden besproken. Het bevindt zich onder het tafelblad (zie *fig. 7*) en bestaat in hoofdzaak uit twee nokschijven die een stang heen en weer bewegen waaraan de kabels zijn bevestigd. De nokschijven worden gedreven door een elektromotor via een koppeling die de nokschijven één volledige omwenteling laat maken als een contact wordt gesloten. De bediening van de machine is heel eenvoudig: men plaatst het paneel in de juiste positie op de tafel en drukt met het paneel het bovengenoemde contact in. Het kastje dat in fig. 7 rechts onderaan de tafel zichtbaar is, bevat behalve een hoofdschakelaar en zekeringen, een eenvoudige gelijkrichter die de spanning voor de koppeling levert.

Ten slotte vergelijken we nogmaals de slagmontage met de volledig gemechaniseerde lijnmontage. De mogelijkheid van een hogere montagesnelheid bij de slag-

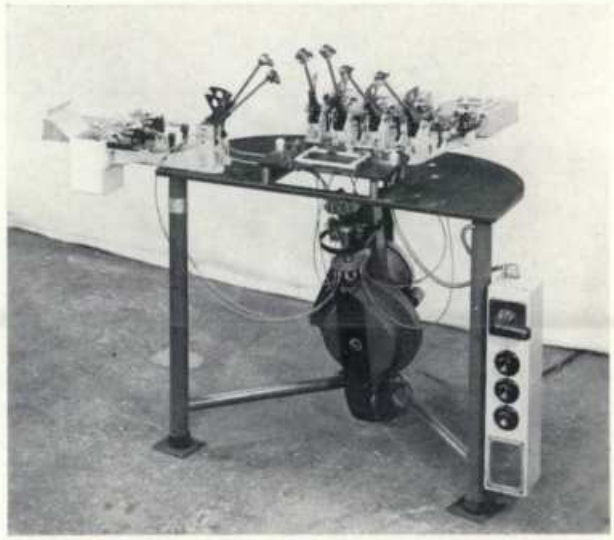


Fig. 7. Een klapklauwtafel met zes klapklauwen. Onder het tafelblad is het aandrijfmechanisme zichtbaar van de Bowden-kabels die de armen heen- en weertrekken. Deze aandrijving komt in actie als het paneel op zijn plaats is gelegd en tegen een contact wordt geduwd (zie ook titelfoto).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

montage is hierboven reeds genoemd. Belangrijk is ook dat door de eenvoudiger uitvoering van de montage-eenheden het aantal storingen veel kleiner is. Daar staat tegenover dat de montagelijn tijdens de produktie door het bedieningspersoneel eenvoudig en snel kan worden versteld voor de montage van een ander type paneel, terwijl dit bij de klapklauwtafel meer tijd en vakmanschap vereist. De investering voor een bepaalde produktiecapaciteit is bij de slagmontage lager dan bij de lijnmontage, maar door de eenvoudige verstelbaarheid kan, indien verschillende typen panelen kort na elkaar bewerkt moeten worden, de duurdere lijnmontage toch rendabeler zijn. Zo tekent zich voor elke methode een eigen gebied af: voor de slagmontage grote of middelgrote series van slechts een of twee typen panelen, en voor de lijnmontage een grote produktie met een grote verscheidenheid van typen.

Bij de hier beschreven methodes wordt nog steeds gebruik gemaakt van onderdelen in de conventionele vorm. Een grote vereenvoudiging van de montagemachines en daarmee een aanzienlijke verlaging van de kosten zullen in de toekomst zeker nog bereikt kunnen worden als de vormgeving van de onderdelen beter zal zijn afgestemd op het mechanisch monteren.

Samenvatting. Slagmontage is een nieuwe techniek voor het monteren van onderdelen in panelen met gedrukte bedrading. Hierbij kunnen een aantal onderdelen (maximaal tien) *tegelijkertijd* worden gemonteerd in een paneel, dat met de hand in de machine wordt geplaatst. De onderdelen worden in bandvorm aangevoerd. Rondom het paneel staan een aantal zg. klapklauwen, elk bestaande uit een arm met een monteerkop aan het uiteinde. De arm maakt een zwaai van 180°. In de ene uiterste stand snijdt de kop bij het neerkomen een onderdeel uit de band en grijpt het vast, in de andere uiterste stand slaat hij het onderdeel in het paneel. Tijdens de zwaai roteert de arm 180° om zijn eigen as, zodat het onderdeel in de juiste stand boven het paneel komt. Deze rotatie wordt door middel van tandwielen afgeleid van de zwaaibeweging, waarvoor, aangezien de rotatie eerder moet zijn voltooid dan de zwaaibeweging, een tamelijk ingewikkeld mechaniek nodig is. Het aanvoeren van de onderdelen gebeurt door een hefboomstelsel dat eveneens door de arm wordt bediend. In het artikel wordt een vergelijking gemaakt van de slagmontage met de vroeger beschreven volledig gemechaniseerde lijnmontage.

Jaargang 27, 1965/66, no. 1 blz. 1-28 Verschenen 25 augustus 1965

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!